

国际信息工程先进技术译丛

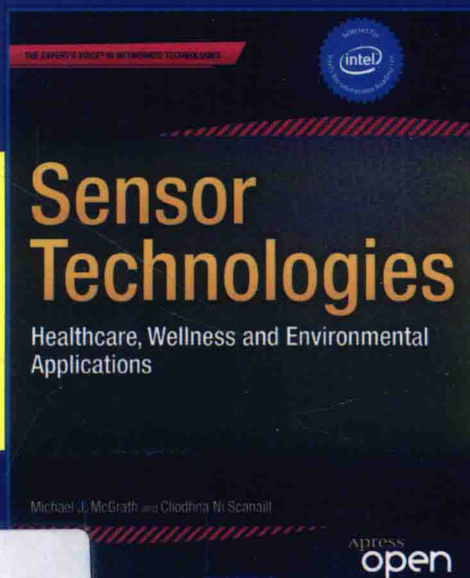
Apress®

智能传感器：医疗、健康和环境的关键应用

Sensor Technologies: Healthcare, Wellness and Environmental Applications

[爱尔兰] 迈克 J.麦格拉思（Michael J. McGrath）
克莱娜 N.斯克奈尔（Cliodhna N í Scanaill） 等著

胡宁 王君 王平 译



◎ 以真实案例深入剖析传感器在医疗、健康、环境监测等领域的关键内容，分享深入见解与实用经验

◎ 掌握可穿戴、智慧医疗、环境监测中的先进传感技术

◎ 简单易读以帮助你更好理解传感器技术的各种进展与挑战





机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际信息工程先进技术译丛

智能传感器：医疗、健康和环境的关键应用

[爱尔兰] 迈克 J. 麦格拉思（Michael J. McGrath）
克莱娜 N. 斯克奈尔（Cliodhna Ní Scanaill） 等著
胡 宁 王 君 王 平 译



机 械 工 业 出 版 社

在智能时代，智慧医疗、穿戴式运动追踪、生活环境监测等相关科技产品正逐渐改变人类的生活方式，而这其中传感器起着关键作用。

本书正是基于此从基本理论和现实具体案例应用等方面对传感器技术在医疗、健康和环境监测中的应用进行了深入的探讨。

本书将帮助临床医疗和技术研究者、工程师、学生等广大读者理解并解决在学习、开发传感器应用过程中面对的技术性与非技术性的挑战。

Sensor Technologies: Healthcare, Wellness and Environmental Applications. by Michael J. McGrath, Cliodhna Ní Scanaill, ISBN: 978-1-4302-6013-4.

Original English language edition published by Apress Media.

图书在版编目（CIP）数据

智能传感器：医疗、健康和环境的关键应用/（爱尔兰）迈克·J. 麦格拉思（Michael J. McGrath）等著；胡宁，王君，王平译．—北京：机械工业出版社，2016. 8

（国际信息工程先进技术译丛）

书名原文：Sensor Technologies: Healthcare, Wellness and Environmental Applications

ISBN 978-7-111-54459-3

Ⅰ. ①智…　Ⅱ. ①迈…②胡…③王…④王…　Ⅲ. ①智能传感器-应用-医疗卫生服务-研究　Ⅳ. ①TP212. 6②R197-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 179626 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）

策划编辑：林　桢　责任编辑：闾洪庆

责任校对：杜雨霏　封面设计：马精明

责任印制：李　洋

保定市中画美凯印刷有限公司印刷

2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 20 印张 · 404 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-54459-3

定价：89.00 元

译 者 序

传感器技术是物理、电子学、光子学、机械学、化学以及生物学等的交叉研究领域，广泛地应用于科学研究和产品设计等领域。传感器在医疗、保健及环境监测应用上的使用已经变得非常广泛。随着社会经济的不断发展与人类生活水平的不断提高，人们对于自身医疗、健康和环境监测方面的要求也越来越高。为了保证医疗质量，进一步降低医疗成本，越来越多的传感器技术融入到了人们的日常生活中，用于对人体生命体征和各种活动的实时监测。与此同时，医疗方式也从传统的被动医疗的模式逐步转向积极的预防保健模式，极大地降低了社会的医疗负担和成本。传感器除了应用于医疗保健领域，同时还被广泛地使用于与人自身健康相关的环境监测领域，从多个方面最终实现对人体健康的全面保护。

本书的作者从基本理论和应用的视角对传感器技术在医疗、健康和环境监测中的应用进行了深入的探讨，给传感器的发展、使用和评价提供一些实用的见解，有助于临床和技术研究者、工程师、学生等理解在发展传感器应用过程中传感器面对的技术性与非技术性的挑战。本书第1章为引言，概述了全书的主要内容；第2～5章，主要介绍了传感器和创建一个点对点智能传感器应用所需要的硬件和软件知识；第6～8章，重点描述设计一个成功的传感器应用所需考虑的各种相关的非技术因素；第9～11章，主要内容是如何将这些传感器应用于医疗、健康和环境监测；第12章对全书进行了总结与展望。读者可以连续地阅读每个章节，也可以选择感兴趣的章节进行阅读。在整本书中，作者加入了与章节内容相关的辅助材料，从而让读者能更加深入地理解主题信息。作者从医疗、健康和环境监测的视角讨论这类特殊的传感技术，本书的核心内容同样也适用于其他类型的传感技术领域。

本书由浙江大学生物医学工程与仪器科学学院生物传感器国家专业实验室从事生物医学传感与检测技术的多位教师与研究生共同翻译完成，包括张希、邹莹畅、苏凯麒、秦臻、黎洪波、孙启永、屠佳伟、张斌、高凡、郭添添、孙斐，全书由胡宁、王君和王平统稿。他们结合各自的科研工作，除了对英文原文进行了忠实原著的翻译外，还对原著中部分专业叙述进行了相应的解读和说明，并对书中的个别错误进行了更正，使其便于国内的广大读者阅读和理解。本书可供从事该领域及传感器与生物医学交叉领域的研究人员和学生阅读使用。

本书内容所涉及的研究领域非常广泛，限于译者的水平，翻译过程中难免存在错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。译者的联系邮箱为 cnpwang@zju.edu.cn（王平）。

胡宁　王君　王平
浙江大学生物医学工程与仪器科学学院
生物传感器国家专业实验室
2016年11月，杭州

原书作者简介



Michael J. McGrath 博士是欧洲英特尔实验室的高级研究员，已经在英特尔实验室工作14年，承担过多个项目的管理和研究工作。他的研究领域包括环境和穿戴式的传感器应用、网络技术、移动技术和数据管理技术。他曾担任独立生活科技研究中心（TRIL Centre）的项目负责人，主要研究方向是发展支持独立生活的技术。他与他人合著了《Wireless Sensor Networks for Healthcare Applications》（2009年由美国 Artech House 出版社出版）。他于1992年获得爱尔兰都柏林城市大学分析科学专业的理学学士学位，1995年获得都柏林城市大学传感器与仪器专业的博士学位，1999年获得都柏林城市大学信息技术专业的研究生文凭，2004年获得布兰察斯镇理工学院计算专业的研究生文凭，2007年获得布兰察斯镇理工学院计算专业的硕士学位。

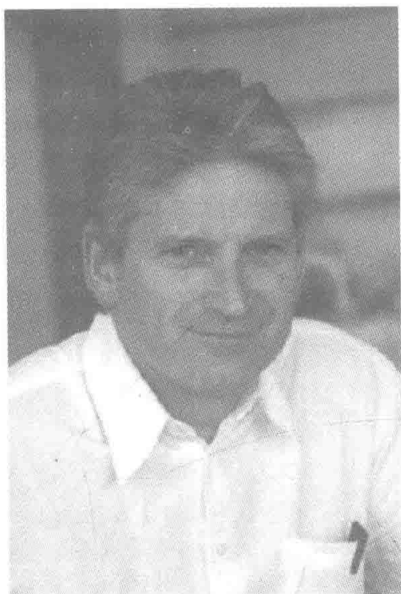


Cliodhna Ní Scanaill 博士是欧洲英特尔实验室的高级传感器应用工程师，她开发和使用大规模传感器系统用于环境监测。在2006年加入英特尔实验室前，她已经在独立生活科技研究中心致力于防跌倒的研究5年多时间，担任软件工程师、研究员和项目负责人。她的研究方向包括跌倒和老龄化、体育和健身传感技术、传感器网络的设计及其管理。她获得爱尔兰利默里克（Limerick）大学计算机工程专业的工程学士学位和生物医学电子学专业的博士学位。她的博士毕业论文是《使用短消息服务远程监护老年人》。



Dawn Nafus 博士是欧洲英特尔实验室的高级研发科学家，她负责人类学研究用于激发新产品开发及其策略。她获得英国剑桥大学人类学专业的博士学位，曾经是英国埃塞克斯大学（University of Essex）的研究员。她在学术杂志发表了很多有关技术和社会的文章，并与公共政策制定者和行业领导者一同解决问题，例如扩大公众在开源社区参与度。她的研究方向包括时代经历、技术和现代化相关的信仰、评估全球技术应用的政治、数字人类学。

原书技术审阅人简介



Dermot Diamond 分别在 1987 年和 2002 年获得英国北爱尔兰的贝尔法斯特女王大学（Queen's University Belfast）化学传感器专业的博士学位和互联网规模传感技术专业的理学博士学位，曾于 2002～2004 年任都柏林城市大学的副校长。他在国际期刊上发表了 300 多篇论文，是 18 项专利的发明人，4 本书籍的合著者和编辑。他是都柏林城市大学国家传感器研究中心（www. ncsr. ie）的主任和创始人之一，爱尔兰科学基金支持的传感器网络技术 CLARITY 中心（www. clarity - centre. com）的项目负责人，爱尔兰科学基金支持的 INSIGHT 中心的研究员（www. insight - centre. org）。他于 2002 年在伦敦获得英国皇家化学学会授予的首枚传感器研究银质奖章，基于出色的研究成果于 2006 年获得都柏林大学校长奖。他的研究方向主要包括刺激响应性高分子基础科学、未来自主化学传感技术平台发展、使用分析装置和传感器提供信息构建无线网络系统；建立数字和分子世界相互联系。研究相关的信息详见 www. dcu. ie/chemistry/asg。



Chris Nugent 获得英国北爱尔兰阿尔斯特大学（University of Ulster）电子学系统专业的工程学士学位和生物医学工程专业的博士学位。他现任阿尔斯特大学生物医学工程专业的教授。他的研究涵盖智能环境下移动和普遍技术的设计、发展和评价，这些工作已经被应用于环境辅助生活相关领域。他的研究成果广泛地发表于跨越理论、临床、生物医学工程等众多领域。现在，他是智能环境研究团队的负责人，该研究团队目标是采用集成的和多学科的研究方法，发展家庭人体监护和远程监护系统研究。

原 书 序

生命的数学

你是否通过电子显微镜观察过岩石样本分子的形貌？是否使用红外相机看过沥青的黑色？是否采用微型摄像药丸检测过你的肠道？是否检查过五个月后会出生的宝宝的脚趾？这个世界充满了神秘感，超越了我们传统的五大感官能够感知的范围。

现在，新的时代已经到来，我们可以看到和感受到超越我们自身的、内在和外在的神奇。人体内部和人体外部的传感技术在讲述着揭示、发现和康复的故事，讲述着我们在捕捉心脏跳动信号，测量血氧水平，检测电脉冲信号，给我们的肌肉和神经带来生命和活力，或者使我们的呼吸和体液述说着我们现在和未来的快乐与悲伤的故事。我们能感知和叙说这些快乐与悲伤，并把它们尽可能地利用起来。

生物传感器能感知我们的健康和幸福，它们已经融入我们的日常生活。我所说的生物传感器的定义非常广泛，作为传感器检测我们的身体属性和居住环境。因此，我们的计划是使用生物传感器检测健康的可见的和不可见的物质，加强测量的准确性，并用传感技术为人们做出快速响应和预警。

为什么？为什么是现在？因为我们已经准备好了，因为我们必须这样做。我们准备好了，是因为主要的技术发展趋势正在发生融合：信息革命包括全球网络、流行的计算和作为商品的计算机程序（“应用程序”）；与此同时，纳米技术的进步为使用合适的传感器铺平了道路。我们必须这样做，是因为存在急需解决的问题，从而满足生活的多方面需要。

我们很幸运地生活在这样一个时代，一个军事、医疗和工业进步在排队加入智能手机革命的时代，它并不是火箭科学或者心脏手术，而是可能在全球普及并适应我们日常生活的相关需求。

数字生活

对我来说，这些都是我发自内心的感受。我是一个糖尿病患者，正是科技才能使我活下去——感谢葡萄糖传感器的 30 多年的发展。传感技术在我日常生活中的作用已经帮助我成为全球技术先驱公司的一名生物传感技术决策者。

糖尿病是一个被信息技术控制状态的最好例子。从本质上讲，状态是碳水化合物消耗、药物摄入和运动之间相互影响——作为个人监测的生物传感器。基于相互影响，我可以做一个计算：如果我食用的蛋卷冰淇淋拥有 28g 的碳水化合物，我把它除以 4（我自身的特定系数），然后注射 7 个单位的胰岛素。如果我的生物传感器，也就是葡萄糖测定仪测量的结果 100 个单位太高，我就将碳水化合物除以 50

后再注射2个单位的胰岛素。如果葡萄糖测定仪的读数小于70个单位，我就吃25g的糖。有点复杂，但这就是它如何工作的，而且确实这样工作。

目前，有成千上万的葡萄糖测定仪。最近医疗保健系统的一大发展就是持续的血液监测，对于那些有糖尿病的人、医生、其他纳税人来说，这绝对是革命性变化。我们不仅能高分辨率地管理血糖，更好地模仿我们受损的新陈代谢，而且可以让我们见到日常血糖的情况，给我们新的令人兴奋的见解和实践，减少日常管理的负担。我们能够认识到我们行为的直接原因和影响，最终改善我们的生活，降低医疗保健费用。如今很多专家承认，这对护理人员和患者来说是一个神秘的世界。

固执己见的信息技术专家容易将期望寄托于最后的前沿——“人工胰腺”。这不是一个植入器官，而是一个软件，输入连续的血糖测量和计算说明至胰岛素泵。有热情的医疗技术员会乐意遵循相似的发展路线提出其他几个条件。

力量的神奇转变

你会感到惊讶：今天医疗系统正在经历一场大的转变，糖尿病患者可以自己控制药物摄入。是的，实际上我们一旦稍微过量使用了胰岛素就会有致命的危险。

人们期望的是，生物传感技术的故事也是力量神奇转变的故事。21世纪为我们提供了认识自己，看到以前无法看见的，超越我们传统认知观点，并打破之前少数人控制的巨大而又昂贵仪器。记住数码相机和拍照手机记录下了怎样的世界？我们正奔向一个广泛的领域——医疗和保健、食品和饮食、水、电、环境监测和家庭护理。传感技术将通过提供按需实现健康状态来在医疗服务质量方面发挥关键作用。传感器还可以通过获得新的个人模式护理和服务使服务创新，这些直到现在一直是少数人的特权。

揭示生命的奥秘

生命的奥秘都在我们的眼皮底下，而生物传感器为我们感知周围和现实提供了新的方法。“生物传感技术遍及日常生活”时代，我们每天都会面对很多新的数据；它可能是我们自己的，我们会利用和分享我们认可的数据。我们的传感器将始终开启并始终连接在一起；它们将与其他生物传感器一起工作，通过众包（crowdsource）数据，在发生和复发时间、空间和不同人群中产生新的意义，提取新的模式。这能使我们增加对自己的自省和了解；它也会让我们与所爱的人产生更多亲密的互动，增加我们对周围世界的认识。

心率和步伐、阳光的紫外线、环境污染、大脑活动、细菌——这一切都会被新一代的传感技术消费者所利用，消费者将超过移动时代去开拓新兴功能。

随着技术难度的降低和变得方便使用，这些信号的价格会进一步降低。数据将变得更加容易获得。不需要再通过抽取血液或者其他体液，我们将采用非侵入式的方法——声、光、电、呼吸嗅探和服装来检测这些微小的变化。前人考虑我们身体周围的预兆，尽管采用不同的和更有用的感官，但是生物传感器将证明它们是正确的。

本书是一本介绍传感器及其应用的书，使我们能够拥有更大的权利监测自己的健康、保健和居住环境。我们被引向了未来，一个可以让我们每个人都前所未有清晰地看清人体复杂性，看到我们自己身体的预兆并且可以记录它，使它成为个人或者公共认知的基础。作者提供了令人兴奋的见解，同时希望得到大家的宣传和指正。

生物传感器正在走近我们——欢迎来探究这本展现了时代惊奇、具有权威性、充满奥秘的技术指导工具书。

David Gordon
英特尔集团战略规划总监

原书前言

健康是一切幸福的基础。

——李·亨特 19 世纪英国诗人

当我们刚开始打算写一本关于传感器及其应用的书时，我们还对书的主题和形式有一点犹豫。尽管有一些优秀的关于传感器及其功能的书籍，但是我们还是觉得这是一个机遇，给传感器的发展、使用和评价提供一些实践性的见解。在英特尔数字健康集团和独立生活科技研究中心的六年合作中，我们涉足为数以百计的爱尔兰老人开发和使用医疗技术。在那段时间，我们在多学科交叉的团队中工作，获得了很多病人和临床专家的深入见解，学到了很多有价值的知识。这些经验有助于我们更好地理解传感器技术如何能被成功应用和外部因素如何能影响真实世界的传感器应用。在本书中，我们采用实践和容易理解的方式分享了我们了解的知识。我们介绍的主题包括设备规范、管理传感器的使用、数据形象化和社会因素，这些都是现代传感器应用的基础，很少在传感器或相关领域专业书籍中讨论。我们还讨论了这些技术的发展趋势，比如智能手机和平板电脑的众多应用，影响着传感器在消费市场中应用的扩展。

我们关注医疗、保健、环境监测领域，因为它们是我们在 21 世纪中面对的最大的全球挑战。传感技术在这些领域中扮演着重要的角色，使我们了解影响我们生活的各种因素，包括我们的健康状况、生活习惯、饮食和饮用水、呼吸的空气和居住的生活环境质量。在这个传感技术越来越多的世界，我们想要写一本简单易懂的书，有助于临床和技术研究者、工程师、学生和那些对传感器好奇的人理解在发展传感器应用过程中传感器面对的技术性与非技术性的挑战。我们希望本书也有助于相关领域专家，如临床医生和工程师，从而更加全面地了解传感器的应用。

本书第 1 章为引言，概述了全书的主要内容；第 2 ~5 章描述了传感器和创建一个点对点智能传感器应用所需要的硬件和软件组成；第 6 ~8 章描述了设计一个成功的传感器应用所需考虑的非技术因素；第 9 ~11 章描述了传感器在健康、保健和环境监测中的应用；第 12 章对全书进行了总结与展望。读者可以连续阅读每个章节，也可以选择感兴趣的章节进行阅读。在整本书中，我们加入了参考文献和外部材料，从而让读者能更加深入地理解主题信息。尽管我们从健康、保健和环境监测的视角讨论传感技术，但我们相信本书的核心内容适用于所有传感技术领域。

我们希望在读完本书后，你们不仅会分享我们对传感技术和传感器应用的认识，你们也会分享我们对传感器应用和这些微小设备快速进化使我们的生活变得更加美好的好奇和惊讶。

Michael J. McGrath

Cliodhna Ní Scanaill

英特尔欧洲实验室

目　　录

第1章　引　　言

对于一个成功的技术，现实必须优先于公共关系，因为自然不会被愚弄。

——Richard P. Feynman，物理学家

我们生存在一个不断快速变化的时代，受到人口、社会和经济发展的驱动。每一天，我们消耗更多地球有限的自然资源。我们对地球的影响主要通过城市化、能源利用、废物产生等方面，而这些影响会产生不利的后果。环境的污染水平不断增加，会影响我们的健康和保健。从城市中的雾霾、饮用水的污染到晚间熟睡的干扰，人类活动已经对我们和我们的地球造成了巨大的影响。在20世纪，我们的工作和生活方式有了重大的变化，我们有了更多久坐的生活方式。这导致了越来越多公众的健康问题，如肥胖、动脉硬化、癌症、慢性肝病以及其他生活方式疾病。随着世界人口不断老龄化，平均寿命的增加给我们的医疗系统带来了巨大的压力。各国政府被迫削减一些计划，诸如家庭医疗救助，以降低快速增加的医疗成本，然而现在的模式根本无法扩展到未来。

我们也需要将医疗方式从被动型转为健康导向型。这个转型的主要目标是用最低的医疗系统成本尽可能长地保持人类的健康。无论信息是正面的还是负面的，能为人们提供可操作的关于他们健康及其影响因素的信息都是重要的。系统提供的有关运动、饮食、周围环境等的数据访问入口，同时采用智能的数据处理和呈现方式，这些是支持人类行为改变的关键。这个世界充满挑战，也需要很多解决方案，以应对重大的全球问题。科技，比如传感器技术，能帮助我们应对21世纪中重要的全球性挑战。

传感器在许多现代工业应用中发挥了不可或缺的作用，包括食品加工和运输、空气质量、医疗方法等日常监控。在一个多世纪以来，虽然传感器一直在我们的身边，然而具备综合信息和通信技术功能的现代传感器——智能传感器的出现不超过30年。人们在计算能力、存储、能源管理、各种形式的因素、连接选项以及软件开发环境都取得了显著的进展。同时传感功能也发生着重要的进步。我们已经见证了生物传感器的出现，并且已经应用在各种消费产品中，如测试怀孕、胆固醇、过敏和生育能力。

低成本的微机电系统（Micro Electro Mechanical System，MEMS）传感器的发展和快速商业化，如3D加速度传感器，已经被大量地集成于从汽车到智能手机的各种设备之中。廉价的半导体传感器已经催化了环境传感技术平台新领域的产生，如家庭空气质量监测。低成本传感器的多元化促进了传感技术的普遍性。现在传感器

和传感器网络可以被佩戴或集成到我们的生活环境，甚至是我们的服装中，而且不会对我们的日常生活产生影响。来自这些传感器的数据有望成为新的主动保健的范例，用于潜在问题的早期检测，例如心脏疾病的风险（胆固醇水平升高）、肝病（尿胆红素水平升高）、贫血（血液中铁蛋白水平）等。传感器越来越多地用于监视日常活动，如通过智能手机即时访问运动时我们的状态。我们的健康与我们的周围环境之间的关系正在发生显著的变化。传感器技术能赋予普通公民关于空气和水质等环境问题的信息，如噪声污染。在线共享这些数据支持公民主导传感技术的发展。当人们在网上贡献自己的数据时，包括很大区域范围内参数，如空气质量的众包（crowdsource）分布图就可以被生成和共享。

尽管所有这些发展是值得关注的，而且对许多人的生活是有意义和积极的，有些方面也是需要注意的。正如 Richard P. Feynman 指出的那样，现实必须优先于公共关系。传感器不应被视为解决我们所有问题的万能药。相反，它们应该被视为非常有用的工具。合适的工具需要合适的工作，就像任何复杂的工具，传感器和传感器系统有它们的优点和缺点。传感器及其操作特征的正确匹配是使用的关键。所需的数据准确性必须与合适稳定应用的生命周期相匹配。然而高灵敏和高精度的传感器通常更昂贵，因此，传感器的使用应仔细权衡成本与应用程序的数据质量要求。传感器技术，尤其是无线传感器网络（Wireless Sensor Network，WSN）（见本书第4章），提供各种各样的功能。然而，它们在基于需要清晰的社会或经济效益中的现实世界里有时缺乏意义。这些技术只有在采用创新的方式解决问题，同时其性能等于或优于现有的解决方案时才会有意义。真实和忠诚的消费者数据必须存在。最后，任何讨论使用传感器的潜在成本优势，尤其是无线传感器网络，通常只有在必要操作性能应用程序标准得到满足后才会进行讨论。

在传感器技术尤其在消费领域还有许多挑战。然而，我们相信有很多机会确保快速发展它们的能力来缩小现有的差距。20 世纪预示着基于各种传感方法的各类传感器的大规模出现。21 世纪则是应用它们的世纪——传感器技术和信息通信技术融合的驱动下，影响我们生活的方方面面，尤其是本书讨论的领域。

1.1　本书的主要内容

在本书中，我们广泛探讨了关于传感技术、传感器系统以及医疗、健康和环境监测应用的相关话题。本书针对临床和技术研究人员、工程师、学生、广大群众等，向他们介绍传感器在重要领域的应用现状。读者应该会全面了解技术和非技术的关键挑战，解决点对点传感器应用的发展所存在的问题。我们提供真实的例子，为读者提供传感器应用成功发展、使用和管理的实用见解。读者也会对现在和未来传感器应用对个人、社会和伦理影响有更深入的认识。本书提供以应用为基础来描述在实践和实验中传感器技术的应用。它引导读者从对研究问题的构思，通过设计

和验证过程，到实现传感器应用的使用和管理。本书中所用的项目和例子主要是基于英特尔公司或联合学术研究计划的研究。

传感技术的主题在这30年中已经有了巨大的发展。因此，我们专注的基本传感原理主要为第2章所描述的应用领域。核心主题包括电化学、光学生物传感器和MEMS传感器技术。信息通信技术在同一时期有着深远的影响，从根本上改变了我们在日常生活中使用传感器的方式。第3章涉及了影响智能传感器和传感器系统的关键技术。第4章从架构视角介绍了传感器使用。架构从离散的传感器到无线传感器网络包括物联网大地理区域，在这个区域中，大量传感器连接到互联网从而产生“大数据”。我们对个人使用的离散传感器和应用于大地理区域应用的传感器网络进行了全面的回顾。我们还讨论了传感器在交互机器的应用中日益增加的作用。

传感器和它产生的数据一样有价值，所以，确保传感器的质量是任何传感器应用的关键。我们呈现和使用传感器数据的方式也能极大地影响它的价值。传感器数据的处理、可视化和多元化会在第5章中讨论。监管的考虑因素会在第6章中涉及，尤其是包括在本书中的应用领域的内容。对于我们健康和保健等关键方面感知的能力会对社会产生积极和消极的影响。第7章主要从社会科学的角度涉及这些影响。一个传感器的关键挑战是将实验室的样机转化为现实世界的实际使用。第8章关注于在真实世界中传感器的规划和使用。第9~11章概述当前传感器技术在医疗、健康和环境领域的应用，分析了各自领域的关键驱动和限制因素。我们关注主要的新兴技术实践，如智能手机和平板电脑等移动平台。实践解决方案和创新产品的实例贯穿在这些章节中，还包括了这些解决方案的未来发展。第12章着眼于先驱们是如何在21世纪建立一个新型医学模型。这些视角基于传感器技术的使用并且提供持续的人体监测，从而能更好地认识它的复杂性和影响因素，例如生活方式、基因组成、环境质量等。未来将不会再是医生开药治疗疾病，而是医生为病人提供传感器和应用来诊断他们健康问题的根源。我们也会看到未来影响传感器应用发展的主要趋势，例如在环境应用中众包方式发展使用。

1.2 传感器的历史概述

1883年产生的第一台恒温器被认为是第一个现代传感器。此后，基于多种原理各种形式的传感器不断涌现。早期的传感器是简单的装置，检测关注的物理量，产生了机械学、电学和光学形式的输出信号。在最近的10年，计算、无处不在的通信、网络连接、移动智能设备和云集成已经极大地增加了传感器的功能，如图1-1所示。

直到现在，在医疗领域传感技术的使用还是局限于医院，而在医院以外场所的使用还是非常有限的。技术和护理模式的发展受到患者、家庭保健提供者、公共机构和个人的支持，应用这些发展，他们能更好地管理自己的健康和保健。例如，生

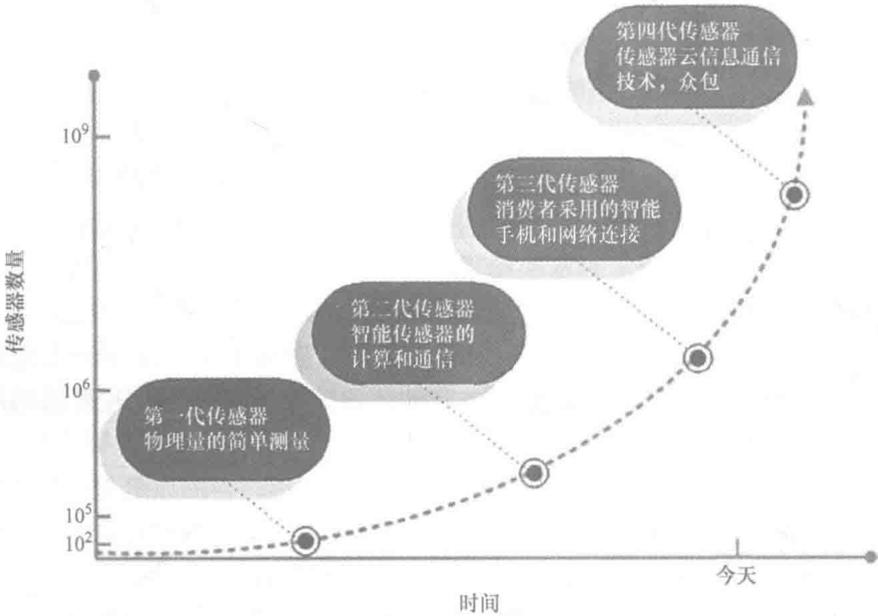


图 1-1 反映信息通信技术水平和消费者应用相结合的传感器发展历史

物传感技术的概念第一次是由 Clarke 和 Lyons 在 1962 年提出。葡萄糖生物传感器的概念到 1975 年才由 Yellow Springs 仪器公司发展为商业现实。生物传感器在这几年迅速发展，它们是数十亿美元的产业。现在它们已经广泛存在于非处方的健康相关应用中，例如家用测试艾滋病、怀孕，以及过敏检测。最近，生物传感器被应用于环境领域，例如检测细菌、杀虫剂和水样中的重金属。

基于 MEMS 的传感器发展使微小和高精度的传感器被集成到从运动手表和消费电子到汽车的各种设备中。MEMS 已经成为本书中所讨论的许多应用领域中的关键部分。在 1959 年，Richard P. Feynman 在加州理工学院发表了名为“在底层有很多空间”的精彩演讲。在这个讲座中，他指出了 MEMS 器件的基本概念和技术。然而，直到 20 世纪 90 年代初，美国政府相关机构才开始加快发展 MEMS 传感器的大型项目。使用半导体制造技术，第一个表面微机械加速度传感器（ADXL50）商品是在 1992 年由 ADI 公司销售。此后，在 1998 年，基于 MEMS 的博世公司陀螺仪被商业应用于汽车行业（Marek et al.，2012）。成本低、高精度、高可靠性运动传感器产生了很多应用，包括那些针对健康和保健的领域。

在最近的几十年中，传感器的发展受到了信息通信技术的深远影响，包括集成微控制器、无线通信模块和永久性数据存储。这些技术能支持一般架构传感器系统的发展。计算、存储和通信特性被用于服务共同连接的多传感器。总的来说，这些功能的增强已经生产出能提供智能传感器解决方案的传感器，这些传感器主要特征包括数字信号处理和无线数据流。在健康和保健领域，无线穿戴式网络在 1995 年

出现。这些网络——通常被称为无线体域网（Wireless Body Area Network，WBAN）——由几个用于生理信号测量的传感器组成，并无线地向计算设备进行传输。

传感器将如何继续发展？许多重要的趋势正在形成。首先我们开始看到传感器的商业化，从有限的、专用的传感器使用过渡到在公众当中普遍的使用。商业化的传感器产品存在于药店、体育用品店、连锁超市和网络。目前，由于重要的品牌在市场上的营销，使得传感器在体育和健康应用方面快速增长。第一款用于个人环境监测关注于提高生活质量的产品已经出现。数据众包，虽然还处于起步阶段，也会通过应用程序、网络和云被连接到智能手机和平板电脑或集成到它们之中。连续传感器的小型化和低成本片上系统（System on Chip，SOC）会持续地补充未来物联网（Internet of Things，IOT）发展。传感器会逐渐融入日常生活，与它们相互作用会变得被动化和日常化。健康、保健和环境监测的关系会持续推进和驱使人类行为的改变。传感器的监测会使我们了解生活方式并影响我们的医疗和健康的因素。数据挖掘技术，尤其是模式匹配和机器学习技术将有助于解开隐藏的模式和传感器的数据关联。这些趋势会让我们首次采用众包使流行病学与个性化定制的健康相关联。

1.3 传感器应用的驱动力

如上所述，各种社会、经济和环境挑战有着全球性的影响。全球人口变化引发如何在21世纪有效地进行可负担和可持续医疗的激烈讨论。技术，包括传感技术则是这些讨论的一部分。有关生活习惯相关疾病（如肥胖）的增加而产生的公共卫生挑战，一直是西方国家关注的焦点。地球在过去两个多世纪的工业化已经对我们的环境质量产生了深远的影响。在同一时期，人类的活动能力如运输对我们环境的影响大幅度增长。越来越多的人意识到了我们整体的自然环境会显著地影响我们的健康和保健。采用传感器技术的解决方法会使人们更好地了解关于环境质量和它们影响因素的信息，使我们能了解这些关键驱动力的更多细节。

1.3.1 健康与健身

由于缺乏锻炼、不良饮食、吸烟和过度的饮酒而引起的生活习惯相关的疾病在全球范围内日益增加。在最近的《柳叶刀》医学期刊上发表的论文表明在2008年有5700多万人死亡，其中约530万人是由于缺乏运动导致的，增加运动可以使生命增加0.68年（Lee et al.，2013）。弗雷明汉心脏病的分析研究也证明了，长期运动有利于预防心血管疾病的发病率（Shortreed et al.，2013）。目前的建议是，每个成年人每周的运动时间为150min。然而，几乎三分之一的成年人没有足够的运动，导致发生更大疾病的危险，例如心脏病和糖尿病（Park，2012）。

我们的饮食在20世纪发生了显著的变化。每十年加工食品和快餐食品在全球范围内都会持续上升，导致脂肪、盐、甜味剂和糖类摄入的上升。消费肉类显著增长，而非桔类的水果、蔬菜和全麦食品减少，这些变化使我们的卡路里的摄入量显著提高，导致肥胖的增加。酒类的消费也发生了变化。世界卫生组织（WHO）估计250万人由于酗酒导致死亡（WHO_a、2011）。尽管在过去的几十年里，西方国家酗酒的人均消费已经稳定甚至下降，然而在其他国家，比如印度，饮酒还是在不断上升。酒的消费已经成为一个重要问题。例如，20%的美国人消费了90%的酒精。相似的情况也存在于其他国家，如荷兰、加拿大。酗酒（消费5杯或者更多的酒）尤其是在周末是很正常的，但这样的喝酒方式会导致严重的健康问题，如昏迷、呼吸抑制、神经损伤等（Babor，2010）。吸烟仍然也是引起疾病的大问题（American Lung Association，2013）。吸烟率在过去的几十年基本不变。据统计，在2000~2050年之间吸烟会导致4.5亿人死亡（Jha，2009）。这些生活方式会对医疗系统产生重大的疾病负担和经济影响（Al－Maskari，2010）。

癌症、心血管疾病和糖尿病是全球导致死亡和残疾的主因（UN_a，2010）。全球疾病负担研究机构指出，年轻人和中年人非传染性疾病的发病率正在显著增加，主要是由喝酒、抽烟和肥胖导致的。例如在西方国家20%~30%的人都患有肥胖症，而且在逐渐增加。那些采用西方生活习惯和饮食方式的亚洲国家，肥胖也在不断地增加，例如印度。肥胖与血糖水平的升高、血脂的增加、血压的升高，以及对胰岛素敏感性的降低相关。据世界卫生组织估计，超重或肥胖是全球第五大死亡风险，导致每年至少280万成人死亡。据估计，世界各地有超过5亿的肥胖人群（WHO_b，2013）。对于那些肥胖人群来说，定期监测血压、血糖、心率和血脂等关键因素，有助于提高对疾病的控制。传感器技术则可以在社区和家里实现对这些参数的监测。

人们保持健康是传感器技术利用的重要驱动因素。人们知道越来越多能影响他们健康的生活方式，正是由于可见的公共卫生活动。每个人都会期望管理自己的体重，并保持足够健康从而积极健康地生活。那些已经超重的人可能想要减轻体重和采取措施以提高他们的健康水平。保险公司也对采用和维持健康的生活方式的个人保险费提供额外的折扣。一些雇主采取措施鼓励员工采用更积极的生活方式，从而有效地减少病假和健康保险费的支出。

现在消费者有了各种健身的方法，从独立的传感技术设备，例如计步器到各种智能手机的应用，再到集成传感器的运动手表。另外，电脑游戏平台，如任天堂游戏机、微软体感游戏机和PS游戏机，这些健身游戏都适用传感技术。许多消费电子设备如智能手机和MP3播放器都集成传感器，其他特性如GPS则也可用于健身应用程序。传感技术和其他技术的结合可以让人们能在日常中监视、维护或提高他们的健康水平。随着人们越来越多地关注于参与体育活动，健身在老年人中也越来越普及。改善肌肉力量、平衡、耐力在保持老年人独立性和减缓或防止疾病出现方

面有着重要作用。目前，这些人并不采用运动传感技术；然而，这在未来可能会改变。健康与保健监测的更大融合将在这些传感技术的使用中发挥重要作用。

1.3.2　人口老龄化

全球老龄化对医疗系统和相关影响已经有据可查。由于医疗水平的进步，更好传染病的预防、饮食的改善，人们可以获得更长的寿命。美国人口普查局预测1970～2020年之间人的平均预期寿命增加12.2%（70.8～79.5岁）。保守估计在21世纪预期寿命将增加13岁（Fogel，2011）。据联合国估计，在全球范围内，平均寿命从2005～2010年的68岁将增加到2095～2100年的81岁（UN_b，2011）。另一些人认为增加可能会大得多。虽然在21世纪增加寿命存在争论，但每个人都认为我们将活得更久，而寿命的增加会对我们的社会有着深远的影响。

许多国家，特别是西方国家，逐渐产生人口老龄化问题。在这个过程中，老年人占总人口的较大比例。65岁以上的人数预计从2010年的5.24亿增加到2050年的15亿。一个有趣的结果是，到2020年65岁以上的人数将超过5岁以下的儿童，这将是人类第一次出现这种情况（WHO_c，2011）。这种人口转变导致医疗服务需求的上升和更高的支出，因为年长的人通常更容易遭受健康问题，包括慢性疾病，这样就会使公共医疗服务的支出增加，引起许多政府的密切关注。

各种努力已经被用于解决医疗支出增加的问题。许多都围绕着信息通信技术展开，包括提供新的传感器、更便宜的社区和家庭监护模式。通过环境监测的日常模式，传感器可以直接或间接地监测人的主要健康指标。在许多方面，家庭医疗保健成为物联网的一部分，初始使用的技术比较静态，而且与观察人物理位置相关。不久的将来会看到更小的、可穿戴传感器可以全天候地监视一个人的生命体征。当超过一定的限制或异常时，如有人无法起床，警报信息可以被发送到临床医生。在完成全球人口过渡中，这些类型的传感器技术使医疗变得可负担和可扩展是十分必要的。

1.3.3　个性化医疗

正如我们指出的那样，由于全球人口变化，医疗经济已经面临相当大的压力。由于成本的持续攀升，需要将人们的注意力从被动的治疗向积极医疗保健方向转变。该模型包括预测、诊断和监测所使用的各种数据源。这种转变的基石是个性化医疗的发展。在这个模型中，我们采用生物化学和遗传学的小团体和个人替代全民流行病学的方法。目前，这些信息开始被用于疾病（如癌症）治疗最适药物的选择。随着下一代针对具体疾病的药物疗法的出现，可以通过基因档案了解病人是否会对特定治疗药物产生反应。诊断测试的需求不断增长，可以为临床医生提供关于患者生物学和疾病相关特定信息，例如肿瘤的细胞特征。此外，需要比较诊断测试和现有的癌症治疗方法。例如，Genentech公司的药物赫赛汀以表达出大量的

Her2/neu 蛋白的乳腺癌细胞为目标。对所有新的乳腺癌病例中测试这两种蛋白，从而确定它们是否能被美国国家综合癌症网络指定的药物赫赛汀治疗。这些测试代表了两种蛋白的诊断和后续的治疗监测，为生物传感器产业提供了机会。

这些针对性的治疗在疾病治疗过程中有了显著进步，但是它们本质上仍然是被动的。个性化医疗的未来将是如何使用传感器技术来建立和监测生物标准，同时快速识别它们。我们开始看到健康图谱的出现，这个图谱是由主动捕捉和记录人们长期的健康情况构成的。《Wired》杂志在一篇题为“知己知彼：跟踪生活的每一个方面，从睡眠到情绪到疼痛”的文章中讨论实用工具与健康相关的指标。该文章描述数据是如何被用来创建个人放大观测器，从而链接到各种数据，成为更大的可读的模式（Wolf，2009）。以这种方式，我们可以进行干预，尽早预防和治疗疾病，从而最大限度地提高疗效，减少长期治疗的影响，将成本降到最低。传感器和信息通信技术（ICT）的结合将导致医药发生变化，这些工具启动已经存在的监测过程，并且这些监测将成为常态，这是传感器技术进入我们日常生活的主要驱动力。

我们应该不能忘了可持续行为变化在个性化医疗中发挥的作用。除了临床诊断应用外，它最终是由人们所使用的传感器数据和他们改正的行为生活方式决定的。由传感器提供的信息通信技术的软件工具可以在支持个人方面发挥着至关重要的推动作用。随着个人行为的变化，传感器数据变得可视化，信息变得个性化，目标变得明确，在线社交支持的建立需要在长远过程中持续进行。这种行为改变的本质不是百米冲刺而是马拉松，有些可能持续人的一生。静态的信息通信技术在短期内可能会有作用，但是在长期过程中会失败。成功的解决方案是将传感技术和相关的支持技术安置在我们周围，这种方式是非常个性化和有帮助的，并随着个人需求不断发展。

1.3.4 公共卫生

医疗的花费通常是大多数国家最为关心的问题。这些花费到 2050 年大约会占到 GDP 的 20% ~30%，而这些比例在经济上是不可持续的（McKinsey，2010）。我们可以发现这部分支出的快速增加是由多个因素形成的，如人口老龄化、生活方式引起疾病的增加、环境因素等。公共卫生政策已经从反应模式向关注保健的预防模式转变。官方认为智能医疗可以在保证质量的同时降低交付的成本。健康和保健已经成为卫生部门改善生活质量方面不可或缺的一部分。越来越多的公共卫生机构正逐渐成为传感器的消费者。目前，最常见的应用是管理、监控家中慢性疾病患者和老年人的健康状况。

健康恢复应用也在被逐渐地关注，例如那些需要从手术中恢复的病人、关节置换和中风患者。针对这些患者团体的商业应用已经可以从西班牙电信和飞利浦公司获得。此外，系统正在支持家庭锻炼项目的交付从而改善老年人的力量和平衡，作为一种针对健康问题（如跌倒）的预防性措施。到目前为止，最初的远程健康解决方案的试验结果有好有坏。最近发表在《柳叶刀》杂志上的文章，分析了在英

国针对远程医疗的整个系统演示程序的有效性。基于输出成本与 care - as - usual 模型的结果比较研究表明它是无效的（Henderson et al.，2013）。然而，大多数问题可以通过这些与技术无关的试验确定。结构性改革医学必须完全接受这些技术在治疗和护理上的价值。不仅许多研究表明远程医疗的使用难以被人们接受，以致使其应用成为障碍，同时迄今为止由一线员工开发解决方案的进展甚微（Brewster et al.，2013）。

这种关注健康和保健存在于我们的生活和公共卫生领域，为非临床传感领域的相关公司提供了发展的机会。这些公司正在考虑通过公共卫生的机遇加强自己的品牌价值和重新定位其产品。这些机遇包括对活动的监测、卡路里摄入量的跟踪、重要体征监测的健康评价等。许多产品与公共卫生中关键信息相关，例如锻炼和活动、饮食管理、早期症状的检测等健康有关的方面。在未来，这些信息将在各国政府争取医疗保健预算中被放大，从而为传感器相关的产品创造更多的机会。

医疗服务面临的另一个关键挑战，将是医生的短缺难以满足日益增长的医疗需求。美国大学协会估计美国到 2025 年时潜在的医生数量缺口高达 12.4 万（Dill et al.，2008）。这种短缺将是不可避免的，因而需要改变目前的医疗保障体系。这种保障体系有可能会更注重护士和医生助理通过使用技术在提供标准化医疗中的作用。传感器将发挥临床工具的关键作用，并且结合智能应用程序使从业者真正理解。这种方法的实例将在第 8 章中介绍。

1.3.5 技术交互

正如我们通过本书看到的，传感器已不是“不会说话的”传感设备，而将通过信息通信技术成为智能传感器和传感器系统。这些功能使传感器能加入到更大的科技生态系统。我们已经能够使用技术交互驱动传感器技术的快速使用。智能手机的销售已经超过十亿部（Reisinger，2012），而在 2013 年智能手机销量首次超过标准手机（Svensson，2013）。3G 移动宽带也被广泛使用，尤其在城市，同时 4G 宽带服务也被发展起来。无论是采用 3G 或者 4G 连接，通用分组无线业务（GPRS）、Wi - Fi、蓝牙变得无处不在。基于云计算技术提供不断增长的数据存储、处理、聚合、可视化和分享的功能。社会媒体给了我们一个众包（传感器）数据机制来分享这些数据，并从网络社区获得数据的信息。有远见的技术开拓者已经利用传感器和信息通信技术定义和创建一个新医学和医疗的未来，从而为深入了解人体提供方法，这在以前是不可能的。在 Eric Topol 的著作《医学创造性毁灭：数字革命如何会创造更好的医疗》中，他描述了我们正处于一个完美的数字风暴中心。传感器和信息通信技术的大融合是“开始照亮人类的黑箱”（Topol，2012）。医生现在通过工具，基于预测、预防和个性化医疗对病人进行护理。传感器和信息通信技术的融合给消费者带来难以置信的能力，来生成关于他们的健康和保健的信息，从而与他们的医生一起参与管理自己的医疗保健。同时还能使他们采用以前没有的方式控

制和利用信息。传感、社交网络、智能手机的连接将对医学产生深远的影响。

传感器技术在过去的30年中快速发展。生物传感器和基于MEMS的传感器开发了大量的可用性产品。生物传感器是传感器市场消费发展的关键基石，它们具有低成本和高准确性的优点。随着人们个人健康所有权的需求不断增加，这个市场将继续显著地增长，许多相关因素在本章中讨论。随着基于MEMS的传感器成本的不断下降，它们可以找到越来越多的消费电子产品。这会使基于健康和保健相关的应用程序快速发展。在日常生活中，当我们接受数据驱动的社会时，个人健康的需求也会持续增长。

1.3.6 国家安全

恐怖主义的威胁仍然是政府和安全部门关注的问题。来自恐怖主义的威胁已经进化，包括化学、生物、放射和核（Chemical，Biological，Radiological and Nuclear，CBRN）攻击。化学威胁涉及使用剧毒工业化学物质（例如异氰酸甲酯）或有毒的神经毒气（如沙林）。生物威胁包括在空中释放和引入水供应的生物制剂，如炭疽热。核和放射袭击构成巨大威胁，尤其是在城市，大量的人可能会暴露于脏弹所产生的放射性污染（通过非裂变爆炸放射性物质释放到大气之中）。

持续不断的监控和预警可以用来防止这些形式的攻击发生。以实验室为基础的检测提供了优良的灵敏度和选择性。然而，国家分析实验室通常在地理上远离危险的位置，因而导致显著的延迟检测。灵活的现场检测传感器对潜在的CBRN不断地提供信息是至关重要的。传感功能，可以在任何时间、任何地方支持检测、识别和CBRN定量化。传感器检测空气、水、土地、人、设备和设施中的威胁是必要的。这些威胁也需要在它们的各种物理状态下检测。持续的威胁将继续推动化学和生物领域中遥感技术的发展，提高了检测物质的灵敏度和灵活性。新的传感器技术也将需要以新的形式出现来应对未来的威胁。例如在环境领域，传感器技术将被要求提供水源和空气质量的连续监测，从而确保其完整性和立即识别可能释放化学生物制剂的能力。各种新的生物传感和光学传感器技术正在发展之中，有希望能够识别当前的威胁，这会使官方反应更快。

1.3.7 物联网

物联网正在成为现实，围绕着我们生活的很多方面。无处不在的连接和信息通信技术的进步使得越来越多的装置连接到互联网。这是引领人生活、学习、工作和娱乐的方式的新一波应用。传感器在连接物理世界（温度、二氧化碳、光线、噪声、水分）与物联网的数字世界上发挥着关键作用。这些数据的利用可以使我们能更积极主动地与我们周围的世界互动（Evans，2011）。

物联网是互联网下一次进化。物联网的成功应用会改善人们的日常生活。传感器可能会在提供数据流中发挥核心作用，这些应用是根据这些数据流资源构建的。

例如，移动和家用环境监控使人们可以检测空气质量。人们使用这些数据来改善他们的环境和行为，从而保持他们的身心健康。因为这些应用程序价值和影响能被公众所见，对于传感器技术改进的需求可能会快速增长。

1.3.8 水和食物

水和食物资源的压力将会在21世纪的进程中增大。一本关于水的词典已经出现。例如缺水、水压力、水资源短缺、水赤字和水危机等术语已经在世界许多地方进入到公众意识。据估计，到2050年受水资源短缺影响的人数将从31亿增至43亿（Gosling et al.，2013）。最近在《卫报》发表的一篇文章描述了一幅更大的画面，表明地球上更多的人会遭遇到水资源短缺（Harvey，2013）。在美国，亚利桑那州和得克萨斯州的西南部、堪萨斯州和内布拉斯加州的中西部，正在面临严重水资源短缺（Stockdale et al.，2010，Koch，2010）。例如中国（Economist，2013）、印度（Duxfield，2013）和非洲地区、中东、亚洲已经面临着水资源的短缺，可能会导致当地和地区紧张局势（Waslekar，2012，Connor，2013）。据联合国估计，世界人口在2025年将增长到81亿（Lederer，2013），由于发展中国家的高出生率和预期寿命增加，这些人口变化将进一步增加对水资源的压力。

Stewart Patrick在他的文章《未来全球水危机》中提到除了气候之外其他引起水危机的原因。全球人口变得越来越城市化，在个人消费、卫生需求、公共基础设施支出方面处于增长的领先地位。饮食偏好的变化随着全球中产阶级的扩大将会对肉类的消费量产生重大影响。这将导致牲畜饲养的增加，水资源的消耗（Patrick，2102）。水资源的管理在全世界大部分地区都非常差。尤其是西方国家，由于基础设施陈旧，多达50%的水由于渗漏流失。发展智能水电网集成传感功能在公用事业和政府组织中获得良好的声望。传感器将提供渗漏检测的方法，以及水质问题的检测，如处理问题和污染。传感器通过更好的管理和保护，有助于改善水资源的可持续性。这将需要继续发展传感器，将实验室分析能力转移到现场保护这些资源。我们还将看到如何生产新鲜的饮用水，如无化学的生产和污水处理。这些创新需要传感器技术来提供持续的监控，保持水质，从而保护人类健康和环境。

在农业领域，用水是非常低效的，尤其是对灌溉。联合国确认灌溉用水占了人类用水量的70%。相比之下，工业占了20%和市政使用约为10%（UN_c，2013）。目前，灌溉通常是基于时间表，而没有系统智能提醒。使用传感器来测量土壤水分，结合周围环境和作物特有参数的监控，将使灌溉作物变得智能。这将有助于减少水消耗，同时保持或提高作物的产量。

消费者会受到健康问题的驱动从而采用传感器技术测试他们饮用水和食物的质量，这是一个发展趋势。人们越来越关心他们的食物类型和来源。有健康意识的消费者会接受有机食品。传感器可以用来识别有机食品。面向消费者测量水质的传感器也已经出现。传感器数据可以很容易地在线共享用于众包的知识。这些知识会让

人们在倡导改变或者改善他们的水和食物供应时做出明智的决定。

1.3.9　环境挑战

在我们的日常生活中有很多潜在的因素，直接影响我们的健康和疾病发展。水和空气的质量差、食品中的病原体、噪声和光线污染将持续对我们的健康产生重要影响。城市化进程的加快、机动车辆和其他运输工具使用的增长，人类、动物和工业废物产生的增多以及其他一些因素都给我们的自然环境增加了压力。这些空气质量的影响在许多大城市都是非常明显的。烟雾云，通常在许多大城市中普遍存在，极大地影响人们健康，容易使人们患呼吸系统的疾病，如慢性阻塞性肺病（COPD）和哮喘。在全球哮喘病例中，处于在烟雾、气体或尘埃的工作场所的人约占11%（WHO_d，2007）。哮喘的患者数量在全球基础数量上继续增加。2001年，美国大约1/14的人患有哮喘，这个数字在2009年增加到了1/12（AAAAI，2013）。人们现在转向采用传感器技术来更好地了解空气质量等参数和身体健康之间的关系。

制度上的环境监测，特别是空气质量，确实为我们提供了环境质量的信息。然而，这种形式的监控缺乏人们期望或要求的地理维度和交互性的信息。现在商业传感器技术开始出现，让人频繁地追踪监测他们的家庭环境和其他地区的空气质量。其他传感器应用的出现，可以用来识别和跟踪那些会引起哮喘和其他呼吸系统疾病的花粉和灰尘。这个信息可以使人们调整上班或上学的路线，从而避开可能会影响他们身体状况的污染区域。尽管这些应用的市场发展相对来说还比较新，然而它们的作用已经非常重要。这些技术和产品的发展在未来十年将飞速增长。这些增长将会改变人们对传感器在实际应用的作用。个人观点将从通常的认识转变偏向个人前景发展。这些观点将会增加传感器数据和生活环境的交互性，从而改善人们的健康水平。数据将通过网络和云计算被共享和分析，并通过使用在线社区的集体智慧和分析数据潜在的影响，从而努力使个人理解数据的含义。这些活动会在很多方面反映健康和保健领域的情况。随着时间的推移，这些领域将在个人和团体的努力下发生更大的重叠，从而使他们了解环境质量，例如他们家庭的环境质量对个人健康和保健的影响。

1.4　传感器应用面临的挑战

这些传感器应用的驱动是非常有意义的，而且会继续增加。现有的传感器技术的改进和新技术将持续提供新型创新应用。需求依然存在而且在不断增长，但是传感器技术是否能满足需求？我们不能把需求等同于实现。通过在互联网、文献和公共评论里搜索可以使我们深信完整功能的传感器解决方案能满足我们的所有需要（McAdams et al.，2012）。我们不能觉得传感器是万能药，能满足我们的所有需求，因为真实情况更加复杂。

传感器分解到各自架构非常重要：独立、穿戴式无线网络和更多无线传感器网

络。每个配置都有其自身独特的挑战，其中一些比另一些更加有意义。在三种配置中，传感器数据的质量是最基本的要求。对于穿戴式的应用，解决传感器与人的接口是非常有挑战性的问题，如合格、舒适性、手工引入、卫生问题都是需要被涉及的关键问题。对于诊断应用，巨大的监管障碍可能需要加以解决。没有通过监管部门批准的家用测试产品的精确性有可能被质疑。

独立的传感器，确保代表性样品的测量是有挑战性的。实际的应用于传感器的技术对数据的质量和准确性有着很大的影响。然而廉价的传感器能被用于获取数据，而以损失数据质量为代价。在这样的情况下，传感器数据的质量还是依赖于精确测量，不精确的测量会引起虚假的安全感或者不必要的报警。

对于无线传感器网络，通信、电源、使用成本和远程参与性是影响无线传感器网络应用的关键因素。无线传感器网络的使用（几千个节点）还没有得到有效的解决，并且具有挑战性。在本书中，我们提出了技术、社交和组织相关的传感器应用、使用和实用化。尽管我们知道传感器具有奇妙的功能，但也要考虑实际应用的情况。从使用传感器更现实的观点出发，我们应该更好地设定实际的期望目标，合适地使用传感器，并不断地实现用户的需求。

1.5 传感器实现创新

在过去的10年中，人们越来越重视在我们周围的世界中植入智慧，使它变得更聪明。智能愿景包括城市、交通、能源、健康、家庭和公共建筑物，以及其他领域。本章中指出复杂混合的挑战驱动了实现智能环境和活动的目标。我们越来越需要创造性的解决方案，可以少花钱多办事，以满足这些越来越多的挑战。创新会将伟大的想法推向市场。例如，到2020年60%的世界人口将居住在城市，要实现这些城市的居民可持续的生活环境具有巨大挑战。

传感器正在成为、也将继续成为创新解决方案的角色。智能技术——例如智能传感器，数据采集系统，普遍的数据连接和大数据的分析——提供了关键技术的基础部分。将它们合理地聚合在一起，会使它们变得更高效、可扩展和低成本。它们还是一个提供长期解决方案的创新平台，能产生有意义的民众参与或者“依赖”。这些系统的潜能会持续发展，你们通过本书看到智能手机和平板电脑通过技术融合成为了创新的催化剂。传感、地理定位、成像、软件和普遍连接以这种单一形式因素呈现出吸引人的场景，在医疗方面，传感器的使用被应用到日常监测中，提供诊断能力和日常健康监测。图1-2显示了各种技术是如何被结合到智能医疗解决方案中的。

有趣的是，这些设备和服务的增加受到了现实世界的驱动。社交媒体和在线参与其他形式会引起公众参与相互交流。这种参与方式已经在共享产品和服务方面起到了重要作用。我们生活的智能方面会有更大的提升，而不是推进现有的方法。智能传感器和服务需要洞察力驱动、样机支持和远见启发，尤其是本书中讨论的领

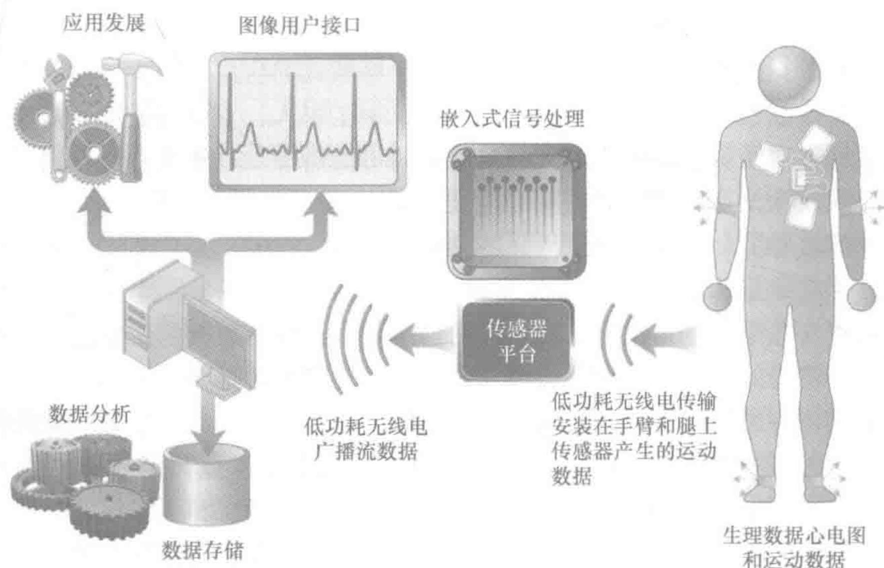


图 1-2 应用穿戴式传感器的智能健康方案

域，因为它们直接关系着人类最终用户。维持创造和分析方法的需求平衡是很重要的。我们必须确保明确的需求和收集充分的意见，使我们能从消费者、科学、工程和经济的角度创造机会。

传感器技术的不断发展，会使传感器越来越小型化。这是在有限的空间中嵌入应用系统的重要条件（如在智能手机中）。商业化的传感器材料能被集成到一些物品中，如衣服里。在研究领域，我们可以看到这些材料很多有趣的应用。这些材料的创新应用会成为连接研究和商业应用的纽带。传感器将继续变得更加智能，通过集成信息通信技术紧密结合。这种结合将为未来的创新产品和服务提供一个全新的平台。

参考文献

Marek, Jiri and Udo-Martin Gómez, "MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) for Automotive and Consumer" in *Chips 2020: A Guide to the Future of Nanoelectronics*, Höfflinger, Bernd, Ed., Heidelberg, Springer-Verlag, 2012, pp. 293–314.

Lee, I-Min, *et al.*, "Effect of physical inactivity on major non-communicable diseases worldwide: an analysis of burden of disease and life expectancy," *The Lancet*, vol. 380 (9838), pp. 219–229, 2013.

Shortreed, Susan M, Anna Peeters, and Andrew B Forbes, "Estimating the effect of long-term physical activity on cardiovascular disease and mortality: evidence from the Framingham Heart Study," *Heart*, vol. 99 (9), pp. 649–654, 2013.

Park, Alice. "*Lack of Exercise as Deadly as Smoking, Study Finds*", Last Update: July 18th 2012, http://healthland.time.com/2012/07/18/lack-of-exercise-as-deadly-as-smoking-study-finds/

WHO$_a$. "*Alcohol*", Last Update: February, 2011, http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs349/en/index.html

Babor, Thomas F., "Alcohol comsumption trends and patterns of drinking," in *Alcohol: No Ordinary Commodity: Research and Public Policy*, Babor, Thomas, Ed., Oxford, UK, Oxford Press, 2010, pp. 23–42.

American Lung Association, "Smoking", http://www.lung.org/stop-smoking/about-smoking/health-effects/smoking.html, 2013.

Jha, Prabhat, "Avoidable global cancer deaths and total deaths from smoking," *Nature Reviews Cancer*, vol. 9 pp. 655–664, 2009.

Al-Maskari, Fatma, "Lifestyle Disease: An Economic Burden on the Health Services", *UN Chronicle - Achieving Global Health*, vol. XLVII (2), 2010.
United Nations$_c$, "Global status report on noncommunicable disease", http://www.who.int/nmh/publications/ncd_report_full_en.pdf, 2010.
WHO$_b$. "*Obesity and Overweight*", Last Update: March, 2013, http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs311/en/index.html
Fogel, Robert W. "*Longer Lives and Lower Health Costs in 2040: Business Class*", Last Update: July 21st 2011, http://www.bloomberg.com/news/2011-07-21/business-class-longer-lives-and-lower-health-costs.html
United Nations$_a$, "World Population to reach 10 billion by 2100 if Fertility in all Countries Converges to Replacement Level", http://esa.un.org/unpd/wpp/Other-Information/Press_Release_WPP2010.pdf, 2011.
WHO$_c$, "Global Health and Aging", http://www.who.int/ageing/publications/global_health.pdf, 2011.
Wolf, Gary, "Know Thyself: Tracking Every Facet of Life, from Sleep to Mood to Pain, 24/7/365", *Wired*, vol., 2009, http://www.wired.com/medtech/health/magazine/17-07/lbnp_knowthyself?currentPage=2
McKinsey & Company, "mHealth: A new vision for healthcare", http://www.mckinsey.com/Search.aspx?q=mHealth&l=Insights%20%26%20Publications, 2010.
Henderson, Catherine, *et al.*, "Cost effectiveness of telehealth for patients with long term conditions (Whole Systems Demonstrator telehealth questionnaire study): nested economic evaluation in a pragmatic, cluster randomised controlled trial," *BMJ*, vol. 346, 2013.
Brewster, Liz, Gail Mountain, Bridgette Wessels, Ciara Kelly, and Mark Hawley, "Factors affecting front line staff acceptance of telehealth technologies: a mixed-method systematic review," *Journal of Advanced Nursing*, 2013.
Dill, Michael J. and Edward S. Salsberg, "The Complexities of Physician Supply and Demand: Projects Through 2025", Association of Americian Medical Colleges (AAMC), 2008.
Reisinger, Don. "*Worldwide smartphone user base hits 1 billion*", Last Update: October 17th 2012, http://news.cnet.com/8301-1035_3-57534132-94/worldwide-smartphone-user-base-hits-1-billion/
Svensson, Peter. "*Smartphone now outsell 'dumb' phones*", Last Update: April 29th 2013, http://www.3news.co.nz/Smartphones-now-outsell-dumb-phones/tabid/412/articleID/295878/Default.aspx
Topol, Eric, *The Creative Destruction of Medicine: How the Digital Revolution Will Create Better Health Care.* New York: Basic Books, 2012.
Evans, Dave, "The Internet of Things - How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything", Cisco, 2011.
Gosling, Simon N. and Nigel W. Arnell, "A global assessment of the impact of climate change on water scarcity," *Climatic Change,* pp. 1-15, 2013.
Harvey, Fiona. *Global majority faces water shortages 'within two generations'*, The Guardian, http://www.theguardian.com/environment/2013/may/24/global-majority-water-shortages-two-generations, 2013.
Stockdale, Charles B., Michael B. Sauter, and Douglas A. McIntyre. "*The Ten Biggest American Cities That Are Running Out Of Water*", Last Update: October 29th 2010, http://247wallst.com/investing/2010/10/29/the-ten-great-american-cities-that-are-dying-of-thirst/
Koch, Wendy. *Global warming raises water shortage risks in one-third of U.S. counties*, USA Today, 2010.
The Econmist, "All dried up - Northern China is running out of water, but the government's remedies are potentially disastrous", http://www.economist.com/news/china/21587813-northern-china-running-out-water-governments-remedies-are-potentially-disastrous-all, 2013.
Duxfield, Flint. "*Irrigation depleting global water stores*", Last Update: July 10th 2013, http://www.abc.net.au/news/2013-07-10/nrn-dist-global-water-shortages/4811140
Waslekar, Sundeep. "*Will Water Scarcity Increase Tensions Across Asia*", Last Update: October 1st, 2012, http://www.forbes.com/2012/01/09/forbes-india-water-wars-across-asia.html
Connor, Steve. *Water shortage in Dead Sea could increase tensions in Middle East*, The Independent, http://www.independent.co.uk/news/science/water-shortages-in-dead-sea-could-increase-tensions-in-middle-east-6273289.html, 2013.
Lederer, Edith M. "*UN: Global population to reach 8.1 billion by 2025*", Last Update: June 13th 2013, http://www.businessweek.com/ap/2013-06-13/un-world-population-to-reach-8-dot-1-billion-in-2025
Patrick, Stewart M. "*The Coming Global Water Crisis*", Last Update: May 9th 2102, http://www.theatlantic.com/international/archive/2012/05/the-coming-global-water-crisis/256896/
UN Water$_b$, "Water Use", http://www.unwater.org/statistics_use.html, 2013.
WHO$_d$, "Global surveillance, prevention and control of chronic respiratory diseases: a comprehensive approach", http://www.who.int/gard/publications/GARD_Manual/en/index.html, 2007.
American Academy of Allergy Asthma & Immunology, "Asthma Statistics", http://www.aaaai.org/about-the-aaaai/newsroom/asthma-statistics.aspx, 2013.
McAdams, Eric, Claudine Gehin, Bertrand Massot, and James McLaughlin, "The Challenges Facing Wearable Sensor Systems," in *9th International Conference on Wearable Micro and Nano Technologies for Personalized Health*, Porto, 2012, pp. 196-202.

第2章　传感技术与传感器基础

传感器采用的换能器种类繁多，它对相应变量进行信号转换，具有技术上的复杂性。传感器检测范围广泛，从相对简单的基于双金属热电偶的温度测量，到复杂的基于光学系统的特定细菌的检测等。在医疗、健康和环境监测领域，有许多传感检测方法，包括微机电系统（Microelectromechanical System，MEMS）、光学、机械、电化学、半导体和生物传感。正如本书第1章中所描述的，基于传感器的应用范围正在发展扩大，检测目标可以是气体、水体、细菌、运动和生理等。同其他技术一样，传感器也具有优缺点。传感器的检测性能由采用的传感方法、应用的环境或系统组成元件共同决定。在本章中，综述了本书所涉及领域中常用的传感机理，以及它们各自的优缺点。最后介绍了针对某个特定应用选择和应用传感器的过程方法。

2.1　传感器和传感技术的定义

对于传感器和传感技术没有统一的描述。在许多情况下，它的定义是由应用决定的。以一般角度来看，传感器可以定义为

一个接受刺激信号并产生响应电信号的器件。

（Fraden，2010）

从应用科学或生物医学工程的角度，在传感器的定义中，产生的输出信号被拓宽，例如，光学信号：

一个能对相应的物理输入产生一个可记录的、功能相关的输出（通常是电或光信号）的器件。

（Jones，2010）

在某些情况下，考虑到检测中的观测元件，传感器也被描述为

一个传感器通常指的是一个将物理测量转换为可被观测器或者仪器读取信号的器件。

（Chen，et al.，2012）

因此，抛开传感器应用领域的差别，传感器只是用于检测人们感兴趣的一些物质，并且提供一些可以利用的输出信号而已。

“传感器”和“换能器”这两个词语都被广泛用于检测系统中，通常这两个词语是可以互相替换的。在美国，换能器使用得更多，而在欧洲更多采用传感器这个词（Sutherland，2004）。传感器和换能器这两个词的确切含义之间的模糊界限导致了一定程度上的概念混淆。

美国国家标准协会（American National Standards Institute，ANSI）为电子换能器的术语制定了标准（ANSI，1975），在这个标准里面将换能器定义为

一个对特定的被测变量进行响应并产生有用输出信号的器件。

输出被定义为一个“电学量”，被测变量是“一个待测量的物理量、特性或者状态”。

然而，美国国家研究理事会（NRC，1995）发现，科学文献并没有普遍采用ANSI 的定义（AALIANCE，2010）。相反，出现了一些专注于将物理量转换为可测量输出（电或光信号）这一过程的换能器定义。例如：

换能器将一种能量形式转换为另一种形式，而传感器是将任何能量形式转换为电能。

(Fraden，2010)

也可以描述为

传感器与换能器的不同之处在于，传感器只将接收到的信号转换为电信号，传感器从真实世界收集信息，而换能器只是将一种能量形式转换为另一种能量形式。

(Khanna，2012)

然而，要在传感器与换能器的区别上达成一致共识是非常困难的。传感器发展得越精细，这个问题就显得更加严重。例如，化学传感器可以是经过表面修饰的换能器从而成为传感器，如利用敏感涂层改变换能器的样品接触面。显然，严格的定义通常是有争议的，同时也会部分程度受到工程师和科学家理解上的差异影响。当走向应用发展阶段，这些差异也仅具有学术上的意义了。所以即使在传感器和换能器的定义上存在差异，这对传感器的实际应用几乎没有影响。在本书中采用了传感器最为简单和广泛的定义：传感器利用各种机理，测量一些感兴趣的物质，而换能器将传感过程中的输出信号转换为可以测量的信号。传感器的应用开发者们只专注于实现一个可以在所要求的准确度条件下测量感兴趣变量的传感器系统。一个传感器系统通常由传感器、测量和处理电路、输出系统组成（Wang，et al.，2011）。它的核心硬件组成部分将在本书第 3 章中介绍。

2.2　主要传感模式介绍

传感器可用于检测物理、化学和生物量等各种参数，包括蛋白、细菌、化学物质、气体、光强、运动、位置、声音等，如图 2-1 所示。这些检测量信息被换能器转换为与之相对应的能被检测器或外界识别的一种信号。接下来将介绍本书所涉及领域中一些常用的传感技术。

对于任何检测量，通常有不止一种传感器可用于对其进行测量。每种传感器的准确度、灵敏度、特异性或者能适用的操作环境是不同的。此外也有成本方面的考量，一般情况下，越昂贵的传感器性能越优异。传感器可通过下面三种方式对待测

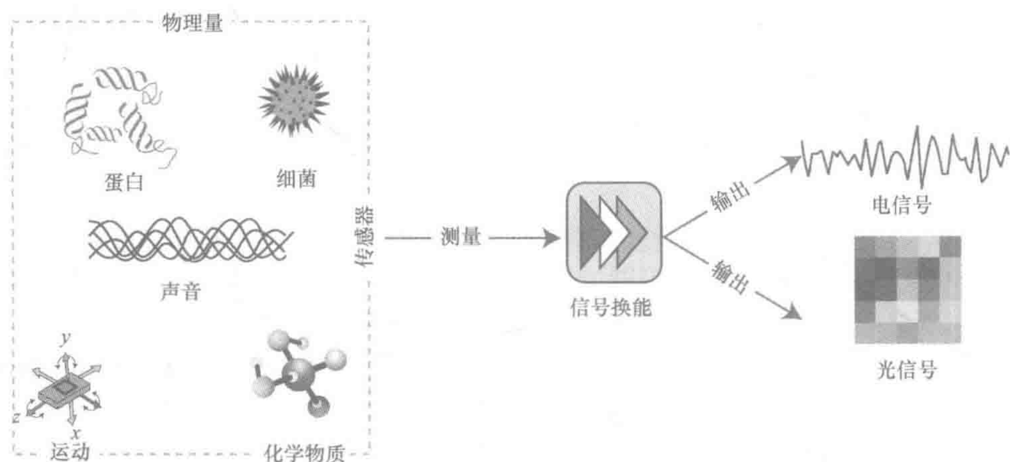


图 2-1　物质检测的传感识别过程示意图

量进行检测：

1. 接触式

这种方式需要与待测对象进行物理接触。许多种类的物质可通过这种方式进行检测，如液体、气体、人体等。这类传感器的应用在一定程度上对测试样品或者对象的状态具有扰动作用，这种影响的形式和程度是与应用息息相关的。下面以人体相关的应用为例进行详细介绍。

对于在体接触式传感，舒适性和生物相容性是重要的考虑因素。例如，当传感器与皮肤接触时间过长，可能会引起皮肤刺激等诸多问题。传感器的污染也会成为一个重要问题。对于一些传感器，需要长时间的放置在接触位点，那么采取适当的方法将这些负面影响最小化是非常关键的。接触式传感器在尺寸和外围设计上是有严格限制的。接触式传感在医疗和健康主导的应用中得到普遍使用，尤其是需要测量生理参数的情况下，例如测量心电图（ECG）、肌电图（EMG）、脑电图（EEG）等。接触式传感器的响应时间由测量对象输送至传感器测量位点的速率决定。例如，测量 ECG 电信号的传感器具有很快的响应时间，相反，皮肤电反应（GSR）的响应时间较慢，因为它需要让汗液与传感器中的电阻接触，这个过程较慢。接触表面效应，例如电极与人体皮肤之间的电接触的效果，也对响应时间产生影响，若接触较弱，将产生信号噪声或引入伪信号。

在体接触式传感可根据“侵害”或影响的程度进一步分类。侵入式传感器是通过一些小切口或者血管引入并与人体器官接触的传感器，例如体内葡萄糖传感和血压监测。最低程度的侵入式传感包括测量细胞间液的皮肤表面的贴片式器件。非侵入式传感器只与机体存在简单的物理接触，而不产生任何不良影响，例如脉搏氧饱和度仪。

2. 非接触式

这种传感不需要与待测对象进行直接接触。这种方式对待测样品或机体具有最小程度的干扰，这一点具有相对优势。它被广泛应用于环境传感领域，通常这种传感器在安装时被隐藏起来，例如用于家庭环境中监测个人日常活动和行为的传感器。在这些应用领域，需要保持环境或监测对象的正常状态不被干扰或干扰程度较低。应用于非接触式的传感器，例如被动红外（PIR）探测器，通常响应时间较快。

3. 取样式

这种方式涉及侵入性的样品收集过程，通常由人工或者自动取样系统实现。样品移出，通常出现在医疗保健和环境检测应用中，例如检测水体中的大肠杆菌、血液中的葡萄糖浓度等。这些样品可以利用传感器或者基于实验室的分析仪器进行分析。

对于基于传感器的检测方法，通常采用小型的、掌上型的或一次性传感器，尤其是在需要快速检测的场合。传感器的位置通常设计在临近取样点旁边，例如血糖传感器。为了获得更好的性能，人们越来越多地将这类传感器与计算功能结合起来，例如，数据处理、显示、存储和远程连接。

相比之下，分析仪器通常没有尺寸的限制，并且具有多种较完善的功能，例如自校准或样品间的自动清洗和复原。在分析之前，一般需要准备样品。有些仪器集成了样品准备功能。对于非生物样品的测试，通常较快速而且准确性高。生物分析，如细菌检测，通常耗时较长，少则几小时，多则几天。

2.3　机械传感器

机械传感器是测量能引起传感器器件或者材料的形变的输入，其原理是基于通过测量这些形变从而得出输入量（Fink，2012）。这些输入可以是运动、速率、加速度和位移，这些量都能导致机械形变，从而被测量到。如果输入量被直接转换为一个电量输出，这样的传感器被称为机电传感器。机械传感器也可以有其他的输出形式，包括磁、光和热信号等（Patranabis，2004）。

IEEE 传感器理事会认为常用的机械和机电传感方法见表 2-1。

应变片是最常见的机械传感器之一，且形式和种类繁多，被应用了许多年，已成为其他许多种类的传感器中最关键的组成部分，包括压力传感器、测压元件、转矩传感器、位置检测器。这些传感器的原理是基于测量单一材料或组合材料的应变所造成的电阻的变化。一个常用的应变片采用网格状的传感元件，由一层薄的金属箔式电阻（3 ~ 6μm 厚）粘贴在一层塑料薄膜基材（15 ~ 16μm 厚）上组成。整个结构被封装在一个聚酰亚胺保护薄膜中。应变片的标称电阻值为几十欧至几千欧，其中 120Ω、350Ω、1000Ω 最常用。激励电压（通常为 5V 或 12V）施加在应变片的输入端，从输出端读取电压值。mV 级的输出电压值由检测电路测量得到，通常采用惠斯顿（Wheatstone）电桥，如图 2-2（Kyowa，2013）所示。当压力施加在

应变片上，产生的电阻变化使得惠斯顿电桥失衡，从而导致与施加压力大小相关的信号输出。应变片和电桥电阻都可从市场上购买到，且都有封装外壳，这种封装形式常被称为测压元件。

表 2-1 常用的机械和机电传感器

传感器	类型	传感器	类型
应变片	金属应变片	位移	电阻式
	薄膜应变片		电容式
	厚膜应变片		感应式
	箔式应变片		
	体式应变片		
	电阻应变片		
压力	压电式	力	液压负载
	应变片		气动负载
	电位式		磁弹性
	感应式		压电式
	电容式		塑性变形
加速度计	压电式	声波	体声波
	压阻式		表面声波
	电容式		
	MEMS		
	量子隧道加速度计		
	霍尔效应		
陀螺仪	振动结构	超声	压电式
	动态调谐		磁致伸缩式
	MEMS		
	伦敦磁矩		
电位计	弦丝电位计	流量	气体流量
	线性锥形电位计		液体流量
	直滑式电位计		流量控制器
	对数式电位计		
	膜电位计		

应变片的另一种普遍形式是基于一些半导体材料（如硅或锗）的压电特性，也就是当特定材料受到机械压力作用时将产生电荷。这类器件最开始在 20 世纪 70 年代的汽车工业中得到应用，随后应用于其他领域，如运动领域。这种应变片体积更小，但具有更高的单位电阻和灵敏度，而且成本也比敏感栅式应变片更低。

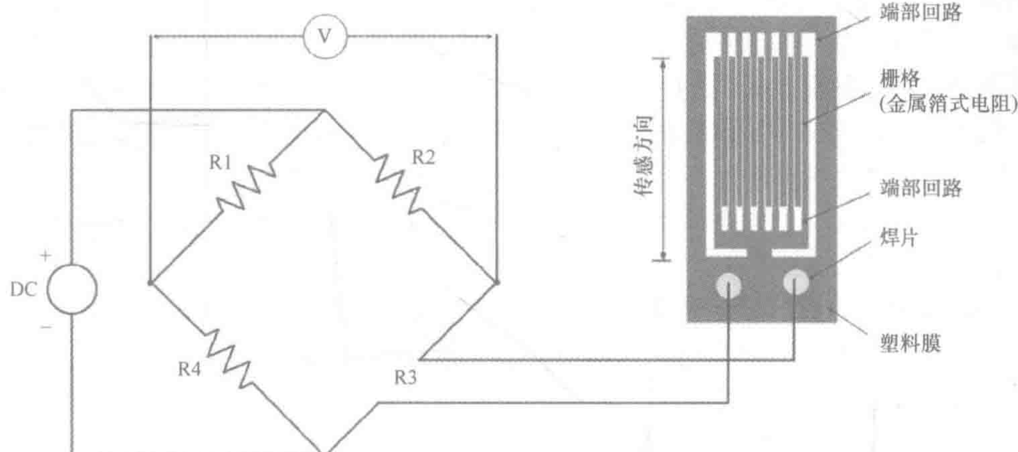


图 2-2　与惠斯顿电桥相接的箔式应变片

应变测量的一个主要问题在于热效应。温度的变化导致敏感元件膨胀或收缩，将引起热致应变。需要采用温度补偿来解决这一问题，温度补偿可以设计在惠斯顿电桥里面。压电应变片对温度变化更敏感，也容易产生更大的特性漂移，在使用过程中必须通过定期校准对其进行补偿。应变片在运动和医疗保健领域得到了广泛的应用，例如用于测试握力的测力计（Kasukawa, et al., 2010, Bohannon, 2011）。

2.3.1　MEMS 传感器

MEMS 这个名词经常用于描述传感器的种类，也用于描述传感器的制备过程。MEMS 是一个三维的、微型化的机械和电路结构，微结构的尺寸范围在 1 ~ 100μm 之间，并采用标准的半导体加工工艺进行制备。MEMS 由机械微结构、微传感器、微执行器和微电子组成，所有结构都集成在同一块硅基片上。

自 20 世纪 90 年代开始，MEMS 传感器在汽车工业中广泛应用，例如，加速度计在安全气囊约束系统、电子稳定程序（Electronic Stability Program, ESP）和防抱死制动系统（Antilock Braking System, ABS）中大量应用。目前低成本、超紧凑型、低功耗多轴 MEMS 传感器的出现导致了消费电子产品器件的快速增长。MEMS 传感器已经出现在智能手机、平板电脑、游戏机控制器、便携式游戏设备、数码相机、摄像机等众多消费产品中。在医疗保健领域如血压计、起搏器、通气机和人工呼吸机等设备上也大量采用了 MEMS 传感器。虽然 MEMS 传感器种类繁多，但最重要、应用最多的两种是加速度计和陀螺仪，由美国模拟器件公司和飞思卡尔半导体公司生产。

2.3.2　加速度计

有五种形式的运动传感：加速度、振动（周期性加速度）、冲击（瞬间加速度）、倾斜（静态加速度）和旋转。除了旋转，这些运动形式都可以用加速度计进

行测量。因此，加速度计得到了广泛的应用，从设备跌落过程中触发硬盘保护系统，到游戏中的手势识别等。MEMS 加速度计通常可以是电容型或压阻型的。电容型加速度计由粘贴在基底上的固定金属板和粘贴在框架上的可移动金属板组成。加速度带来的框架位移，导致差分电容的变化，从而被板上电路测量得到。电容型加速度计具有较高的灵敏度，应用于低幅度、低频率器件中。压阻型加速度计包含一个电阻材料，它与悬臂梁结合在一起，悬臂梁将随着加速度的出现而发生弯曲，从而使电阻材料发生变形，产生一个与加速度大小相关的电阻变化。压阻型加速度计更加坚固耐用，可应用于需要更高幅度和频率响应的场合（Piezotronics[1]，2013，Piezotronics[2]，2013，Nanogloss，2009）。

2.3.3 陀螺仪

MEMS 陀螺仪测量单轴或多轴旋转的角速度，如图 2-3 所示。陀螺仪可以准确地测量自由空间中的复杂运动。它们不采用需要轴承的旋转部件，因此更易于采用半导体加工工艺对其进行小型化和批量生产。几乎所有的 MEMS 陀螺仪都利用振动机械元件（检测质量）来感知旋转，通过感知由科里奥利（Coriolis）加速度引起的同一结构的两种不同振动模式之间的能量转移来实现。最普遍的 MEMS 陀螺仪形式是音叉陀螺仪，它包含了一对质量块，它们可以发生相同幅度但方向相反的振动。当旋转时，科里奥利力将产生一个正交振动，而这一振动可以通过许多机理被检测到（Nasiri，2013）。其他的 MEMS 设计形式包括：振动轮、酒杯式谐振器（半球谐振陀螺）、圆柱振动和压电型。MEMS 陀螺仪的主要生产商包括：罗伯特·博世公司、应美盛公司、意法半导体公司和美国模拟器件公司。在智能手机、跌倒探测器和游戏控制中都采用了 MEMS 陀螺仪。

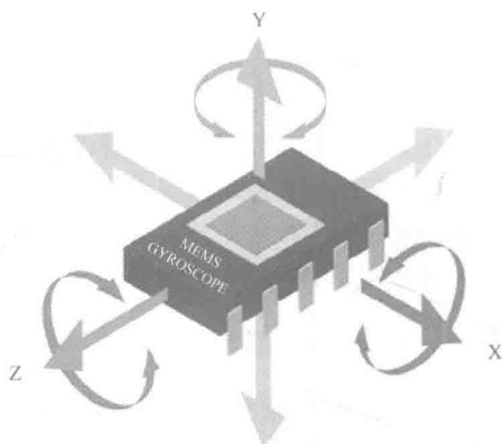


图 2-3 利用 MEMS 陀螺仪测量三维角旋转示意图

2.4 光学传感器

光学传感器通过检测光波或光子来实现测量，包括可见光、红外和紫外（UV）光谱区。该类传感器通过测量被测物发射或吸收的光强的变化来实现待测物的测量。也可以通过相互作用或干扰效应引起的光束的相位变化来进行测量。此外，测量光源的消失或中断也是普遍采用的方法。基于这些原理的传感器被广泛应

用于自动门，以确保在门的打开过程中是无障碍的。这些传感器在工业生产中也得到了广泛应用，例如测量罐体中的液体和物质含量，测量工厂生产线上是否存在或缺少了某种物质。光学传感器与步进电动机一起，被应用在一些需要对位置进行感知和编码的场合中，例如娱乐业的自动照明系统（Cadena，2013）。下面将介绍光学传感器中最常用的一些类型。

2.4.1　光电传感器

光电传感器是基于光导电性原理，也就是当光存在或消失时，目标材料的导电性发生改变。传感器对紫外到红外光谱区内的某一个特定波长范围的光谱具有敏感性。例如：

- 有源像素传感器，应用于智能手机摄像头和网络摄像机。
- 电荷耦合器件（CCD），应用于数码相机。
- 光敏电阻（LDR），应用于街道照明系统。
- 光敏二极管，应用于室内灯光控制系统或紫外光测试系统。
- 光敏晶体管，应用于光绝缘体，适用于医疗保健设备中，使病人和仪器之间为电绝缘的。
- 光电倍增管，应用于分光光度计检测器，以及进行血液分析的流式细胞仪（采用激光技术对细胞进行计数、分类和生物标记物检测）。

2.4.2　红外传感器

红外传感器具有主动和被动两种形式，如图 2-4 所示。在主动形式中，传感器利用红外光源，如发光二极管（LED）或激光二极管等发射的光束，光源的检测采用另外的检测器实现，如光电管、光敏二极管、光敏晶体管。当待测物穿过光束时将中断检测器接收的信号。另一种模式是基于反射率的检测。光源和检测器封装在同一外壳内，红外光源通过待测物的反射后被检测器接收，接收的光量与待测物表面的反射率有关。红外检测器可以作为计数传感器、邻近探测器（如自动门），也可以用于白天或黑夜情况下鉴定人或其他移动物体的存在。

与主动模式不同的是，被动式传感器不产生或发射用于检测的能量，而是检测被测物体产生的热量，例如处于检测场中的人体的热量。该类传感器广泛用于住房周围的安全照明，也用于家庭安全系统中检测闯入者（Fried，2012）。也适用于其他应用领域，这在第 8 章中将进行介绍。

红外传感器通常需要具有低功耗、较高的抗噪声能力，而不需要复杂的信号处理电路。它们的主要缺点在于，需要处于被测物体的视距中，探测距离较短，且容易受到环境因素如阳光、雾、雨和粉尘的干扰（EngineersGarage，2012）。

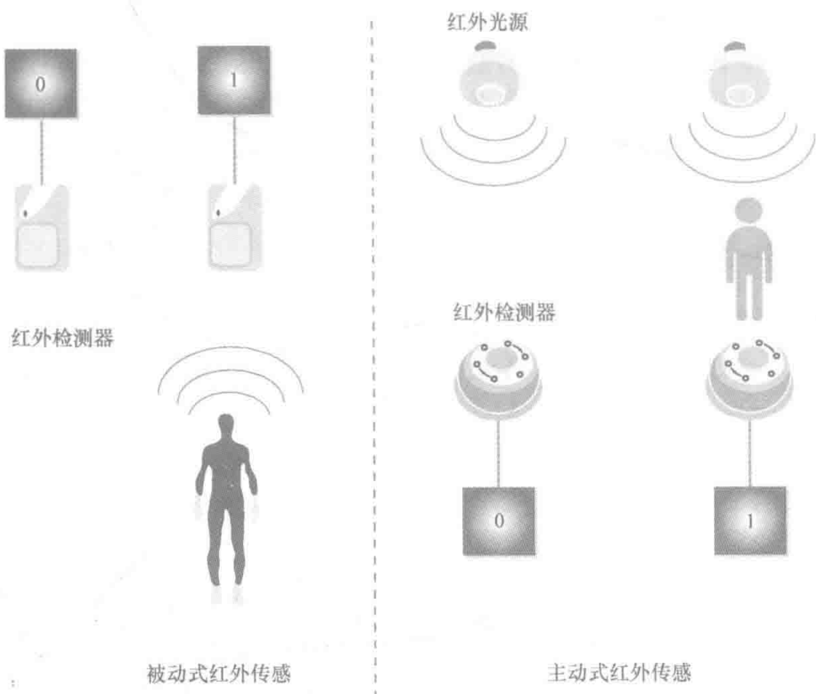


图 2-4　主动式和被动式红外传感模式示意图

2.4.3 光纤传感器

这种光学传感器利用光纤作为敏感元件。具有大芯径（>10μm）的多模光纤被用于构建光纤传感器。光纤外部可以包裹其他材料，从而可对应变、温度或湿度产生响应。最常用的光纤传感器种类包括：

- 应变传感：光纤的机械应变导致光纤的几何特性变化，从而改变通过光纤的光束的折射角。折射角的变化与施加的应变具有相对应的关系。
- 温度传感：光纤的热胀或冷缩将使光纤发生应变。应变测量与温度变化之间具有相应关系。
- 压力传感：光纤压力传感器具有两种类型——强度和干涉测量。对于强度敏感型光纤传感器，从薄膜反射的光强大小与施加的压力相关（Udd，2011）。干涉敏感型压力传感器的原理在于，压力变化给传感器引入微小扰动，导致光纤路径长度的变化，最终导致干涉图样的明/暗带的漂移。通过测量波长谱的漂移，可对施加在传感器上的压力进行定量检测（Lee，et al.，2012）。
- 湿度传感：基于光纤的湿度传感器具有广泛的原理，包括①湿度敏感的荧光染料组成的发光系统；②涂覆聚酰亚胺的光纤吸收湿气之后导致折射率改变；③反射薄膜涂覆的由二氧化锡和二氧化钛制备的光纤，折射率发生改变，从而导致谐振频率的偏移（Morendo－Bondi，et al.，2004）。

2.4.4　干涉仪

干涉仪是用于测量光束传播变化的器件，例如传播路径长度或波长。通常，该类传感器具有一个光源（如激光 LED）和两个独立光纤。光束被分离并耦合到两个光纤中，待测量对光信号进行调制，通过与参考光信号进行对比，可检测出待测量的大小。有四种干涉仪结构：法布里 – 珀罗（Fabry – Perot）干涉仪、马赫 – 曾德尔（Mach – Zehnder）干涉仪、迈克尔孙（Michelson）干涉仪、萨奈克（Sagnac）干涉仪。该类传感器通常用于测量物理量，例如温度、速度、振动、压力和位移（Baldini，et al.，2002）。

由于光学传感器直接或间接利用光进行测量，具有许多其他传感器不可比拟的优势。但是这些优点是针对特定应用而言的，同时也存在着相应的缺点。表 2-2 总结了光学传感器的优缺点。

表 2-2　光学传感器的优缺点

优点	缺点
灵敏度高	易受环境影响的干扰
不受化学干扰	价格贵
体积小、重量轻	易发生物理损害
适合遥感检测	
抗电磁干扰	
动态范围宽	
可监测的化学和物理参数范围广	
运行可靠	

2.5　半导体传感器

由于半导体传感器具有成本低、稳定性好、功耗低、使用寿命长、小型化等特点，应用越来越普遍。该类传感器应用范围非常广泛，包括：

- 气体检测。
- 污染物检测，例如 CO、NO_2、SO_2、O_3（Nihal，et al.，2008，Wetchakun，et al.，2011）。
- 呼吸分析，如呼气酒精含量（BAC）检测（Knott，2010）。
- 家庭气体监测，如丙烷（Gómez – Pozos，et al.，2013）。
- 温度，如集成电子设备的温度（Fraden，2010）。
- 磁力，如六自由度磁力计（Coey，2010，Sze，et al.，2007）。
- 光学传感，如照相机中的电荷耦合器件的探测器（EUROPE. COM，2013）。

2.5.1 气体传感器

半导体传感器通常用于检测 H_2、O_2、酒精和有毒气体如 CO 等。家庭内 CO 检测器是半导体气体传感器最普遍的应用领域。典型的气体传感器具有敏感层和敏感基底，被放置在多孔外壳中。敏感层由一层多孔的厚膜金属氧化物半导体（MOS）层组成，如二氧化锡（SnO_2）或三氧化钨（WO_3）。这一层敏感层被沉积在微传感器上，微传感器含有检测敏感层电阻的电极和一个可以将敏感层加热至 200 ~ 400℃的加热器。当金属氧化物在空气中被加热至高温，氧气吸附在其晶体表面，使其带负电荷，晶体表面的施主电子转移至吸附的氧分子上，使得空间电荷层带正电，这形成了电子流的势垒。当还原性气体（如 CO 或 H_2）存在时，与吸附的氧气层发生催化还原反应，从而降低传感器电阻。氧化性气体如二氧化氮（NO_2）和臭氧（O_3）具有相反的效应，导致电阻的增加。电阻变化的大小与待测气体的浓度相关，并由传感器的微结构和基材的组分/掺杂、敏感层与基底的形态和几何特征，以及传感反应发生的温度（AppliedSensor，2008）共同决定。对于不同的气体或者不同种类的气体，可以通过改变这些参数来调整相应的灵敏度。

虽然半导体气体传感器具有诸如低成本、维护成本较低、使用寿命长等优点，但它在混合气体环境测试中缺乏特异性。其他气体也可能产生信号响应，从而为目标气体的检测带来假阳性结果。为了提高气体传感器的灵敏度，可在气体与敏感材料接触之前进行化学过滤，以去除样品中的干扰组分。过滤器可以是活性的或惰性的，取决于采用的物理（惰性）或化学（活性）过滤机理。根据过滤器在传感器中的位置，可将其分为内部过滤器（直接在敏感元件表面）和外部过滤器（在一个单独模块中）。外部过滤器，如活性炭，被广泛应用于商用气体传感器。

2.5.2 温度传感器

半导体温度传感器基于 PN 结的结电压变化，具有较强的热依赖性。形式最简单的温度传感器就是硅二极管，它的正向偏压具有大约 2.0 ~ 2.3mV/℃的温度系数。可通过保持偏置电流恒定测量其电压的变化。在 ±30°C 范围内，测量结果会发生显著的设备间偏移，为了得到准确的读数，传感器需要进行校准，由于传感器线性较好，采用两点校准法即可。为了使测量结果更准确，可利用二极管连接的双极晶体管。同样地，在发射结施加恒定电流，产生的电压与温度变化线性相关。可能需要采用一定的补偿将信号从绝对温度转换为摄氏或华氏温度。通常，传感器工作范围为 -55 ~ +150℃之间。半导体温度传感器通常可根据输出信号的类型进行分类，如模拟（电压或电流）、逻辑或数字传感器（Gyorki，2009）。这类传感器的优点在于易于集成在电路中、耐用性好、低成本。主要的缺点在于准确性和稳定性有局限，热芯片设计较差，响应时间较慢（CAPGO，2010；Fraden，2010）。

2.5.3 磁传感器

半导体磁传感器检测磁场中的变化或扰动，并将这些变化转换为可测量的电信号，可以反映性能方面的信息，如定向运动、位置、旋转、角度或机械设备中的电流。该类传感器可在医学设备如通气机中用于控制运动的程度；在消费电子设备的附件中用于检测设备的开启和关闭状态；以及用于可再生能源领域，如太阳能装置。例如，在家用太阳能装置中，磁传感器被用在功率变换器中，将太阳能板产生的电能转换为家庭可用的电流。也可用于监测太阳电池板的充电情况（Racz, 2011）。最常用的半导体磁集成电路采用霍尔效应（由 Edwin Hall 于 1879 年发现）或磁阻原理（各向异性的、巨型的或隧道磁电阻）。

霍尔效应传感器由一层薄的 P 型（或 N 型）半导体材料组成，其内带有连续电流。当器件处于磁场中，半导体两端的电压差取决于与电流方向垂直的磁场强度。载荷子（电子）在穿过磁场中运动时受到洛伦兹力（磁场对运动电荷产生的作用力）的作用，洛伦兹力与运动方向和磁场方向成直角。电子在洛伦兹力作用下产生霍尔电压。霍尔电压与穿过半导体材料的磁场强度成正比关系。电子迁移率较高的半导体材料，如铟（In）、锑化铟（InSb）、砷化铟（InAs）、砷化镓（GaAs），被广泛应用于霍尔效应传感器中（Eren，2001）。由于输出的电压通常较小——不超过几 mV，因此需要对其进行放大和信号调节，以提高灵敏度和补偿迟滞（对于给定的输入，上升和下降输出值之间的差异）。对于商用传感器，敏感性、信号放大、电压调整和信号调制功能都包含在单个封装中。

霍尔效应传感器显示出较好的环境抗干扰能力，不受粉尘、振动和潮湿的影响。然而，该类传感器会受到临近的其他来源的磁通量的影响，例如由电线产生的磁通量。该类传感器结实耐用，可以不通过机械接触进行传感检测，但是只在一定距离范围内有效，除非磁场强度很高，否则当距离大于 10cm 就失效。

2.5.4 光学传感器

半导体光学传感器种类繁多，最常见的是光敏二极管，它是一种将光信号转换为电流或电压的光学检测器。光敏二极管通常具有一个开窗或与光纤连接，让光信号到达 PN 结或 PIN 结（在 P 型与 N 型半导体区域之间添加了一层本征半导体区域）。光敏二极管更多地采用 PIN 型，因为 PIN 型比 PN 型具有更快的响应速度。当一个具有足够能量强度的光子轰击二极管的耗尽层时，会与其中的原子发生碰撞并释放出电子，由此产生出自由电子（以及与之相对的带正电的电子空穴）。耗尽层或者一个扩散长度范围内的自由电子和空穴，在外加电场作用下被分隔开。空穴朝正极移动，电子朝负极移动，从而产生光生电流。该光生电流是无光照情况下的暗电流和光照下的光电流的总和，所以为了提高器件的灵敏度，需要将暗电流最小化。光敏二极管具有广泛的应用，包括脉搏氧饱和度仪、血粒子分析仪、核辐射探

测器和烟雾检测器等。

另一种形式的光检测器是光敏晶体管，它本质上是一种双极性晶体管，与光敏二极管类似，具有透明照射窗口，让光信号轰击集电结。照射在光敏晶体管的基极引出端的光强决定了流进集电极引出端并流出至发射极引出端的电流大小。照射光强越大，产生的电流也越大，反之，光强越小，电流也越小。光敏晶体管比光敏二极管灵敏度更高，但是响应时间更慢。光敏晶体管的应用包括检测环境光、监测静脉（IV）输注速率，以及大气监测。对于静脉监测，光敏晶体管粘贴在静脉输液滴注室中，它是一种液滴传感器，对单位时间内液滴的数量进行计数，并反馈至输液泵控制器，以维持既定的流速（Times，2004）。在大气监测中，对红外光谱敏感的光敏晶体管可应用于激光雷达检测，这是一种基于激光的技术，可以监测和分析大气种类和成分，例如水汽、二氧化碳（CO_2）、CO、甲烷（CH_4）和乙烷（C_2H_6）。光敏晶体管应用于将接收的光信号转换为电信号的检测器中。由于接收的光信号受到气体吸收等因素影响具有差异性，从而可将其区分开（Refaat，et al.，2007）。

光敏晶体管的第三种类型是光敏电阻（LDR），它的导电性随着入射光强的变化而成比例变化。当光照射至光敏电阻，光子被吸收，导致半导体材料中的电子发生从价带至导带的跃迁，从而使得器件的电阻降低。光敏电阻在无光条件下电阻非常高（1～10MΩ），当其被完全光照时，电阻降低至几百欧。光敏电阻可由多种材料组成，包括硫化铅（PbS）、硒化铅（PbSe）、锑化铟（InSb）、硫化镉（CdS）和硒化镉（CdSe）。采用的半导体材料不同，得到的最灵敏波长范围也不同，从可见光（390～700nm）至红外范围（>700nm）不等。光敏电阻的应用包括照明控制、相机快门控制、商业照度计等。

2.5.5 离子选择性场效应晶体管

离子选择性场效应晶体管（ISFET）用于检测溶液中的离子浓度，如pH值测量检测的是H^+浓度。在ISFET构建的器件中，样品溶液直接与FET的栅极材料接触，并决定了栅极电压的大小，栅极电压进而控制着晶体管中的漏源电流。因此，当离子浓度发生变化时，漏源电流也随之改变。为了使这种效应具有选择性，ISFET的栅极表面通常需要覆盖一层离子选择性膜，例如，pH值测量中需要采用对H^+敏感的膜材料。SiO_2膜可用于pH值检测，但氮化硅（Si_3N_4）、氧化铝（Al_2O_3）、氧化锆（ZrO_2）、氧化钽（Ta_2O_5）等材料在pH值的响应、迟滞效应和漂移方面具有更好的性能，因此更多地用于pH值检测。ISFET的主要优点在于：尺寸小，可适用于小体积测量；成本低；稳定性好；适用温度范围广。其主要缺点在于：长时漂移；迟滞效应；使用寿命较短等。此外，参比电极的小型化也是一个问题。虽然传统的AgCl或$HgCl_2$电极可作为参比电极使用，但它们并不适用于生物分析或体内分析等需要小型化的场合。研发出合适的参比电极，如可用于ISFET

的固态电极，仍然是一个热门的研究领域（Adami, et al., 2014；Guth, et al., 2009）。目前，不需要参比电极的 ISFET 传感方法也有文献报道（Kokot, 2011）。

2.6 电化学传感器

电化学传感器由敏感电极（或工作电极）、参比电极构成，许多情况下，还需要对电极。这些电极的放置通常需要与液态或者固态电解质接触。在较低温度范围内（<140℃），电化学传感器可以测量 pH 值、电导率、溶解性离子和溶解性气体。当温度高于500℃时，通常采用固态电解质传感器（Guth, et al., 2009），可测量废气和熔融态金属。电化学传感器的原理在于对待测样品中的某种电学参数进行测量，可以根据其采用的测量方法进行分类。

电化学传感器具有许多优点，包括功耗低、灵敏度高、准确度高、可降低表面污染的影响。但是，该类传感器的灵敏度、选择性和稳定性容易受到环境因素的影响，尤其是温度。环境因素也极大地影响了传感器的使用寿命，例如，当传感器处于高温和干燥环境下，传感器的有效使用寿命会缩短。对于气体传感器，目标气体与其他气体的交叉敏感也是一大重要问题。传感器对目标检测物的过饱和现象也会缩短其使用寿命。最主要的电化学传感器分类如下。

2.6.1 电位型传感器

该类传感器测量的是工作电极和参比电极之间的电势差。工作电极电势取决于待测物的浓度（更准确地说是离子活度）（Banica, 2012）。例如，对于 pH 值传感器，工作电极与参比电极之间的电势差，是与待测溶液中的 pH 值成一定关系的。电位型传感器的其他应用包括用于测量无机（如检测环境样品中的金属离子污染以及血电解质分析）或有机离子（如人血浆样品中的芳醛或异丁苯丙酸）的离子选择性电极。

2.6.2 电流型传感器

该类传感器测量的是流过电极上电流的变化。工作电极的电压保持恒定（相对于参比电极），可测量工作电极流过的电流随时间变化。电子传递（电流）取决于施加了一定电压的工作电极表面发生的氧化－还原反应（Wang, et al., 1995）。工作电极可经过一定的设计，使得测量的电流与待测样品中的氧化还原活性物质的浓度成比例。典型的应用包括氧检测（病人监护中检测的氧分压$_pO_2$和二氧化碳分压$_pCO_2$），火灾探测器（如阴燃火中的 CO）和有毒气体检测（如氯气）。

2.6.3 电量传感器

电量传感器检测的是电化学反应产生的以库仑为单位的电量的大小。通过在工

作电极上施加一恒定电压，并检测流经附加电路的电流而实现。待分析物在工作电极上发生完全氧化或还原反应。由于分析物的消耗，测得的电流逐渐降低为零。反应的速率取决于分析物传输至工作电极表面的速率。一些氧电极采用了这种结构的变体形式，也就是同时采用阴极和阳极，并且在两极之间维持一定直流（DC）电压。样品中的氧原子通过一层多孔膜扩散至阴极表面，并发生还原反应。而氧离子 O^{2-} 被吸附到已加热至400℃的固态电解质中，并在阳极被氧化为分子氧。

电量传感器也可用于检测葡萄糖。传感器采用一种对葡萄糖具有特异性氧化的酶——葡萄糖氧化酶，因此传感器检测到的电荷量与样品中的葡萄糖的浓度相关，如果酶促反应完全，那么测量的是样品中所有的葡萄糖含量。这种葡萄糖传感器已投入使用，从原理上讲它最大的优点在于不需要任何的校准，只需要检测电子的量并将其转换为葡萄糖分子的量。不需要校准这一步，可大大降低用于在体测量或植入式器件的复杂性（Andoralov, et al., 2013）。

相比于电流型传感器，电量传感器具有许多优点，包括：灵敏度高、选择性好、稳定性好等。电量传感器另外一个重要的优点在于，如果使用恰当，可以获得待测物的绝对含量。如果传感器的检测腔体体积已知，并且待测物发生完全电解，相应的电量也就对应数量和浓度的绝对测量（Carroll, et al., 2011）。

2.6.4 电导传感器

该类传感器是基于这样的原理：当样品中存在或不存在某种化学物质的时候，电导率发生变化。通常采用两种结构。第一种结构由两种元件组成——敏感导电层和接触电极，传感器两端施加直流（DC）电压，并测量其电阻，这种结构通常用于气体检测中的化敏电阻器。导电层可以是一层多孔厚膜（2～300μm），可允许气体扩散通过，具有较好的灵敏度，也可以是一层薄膜（5～500nm），薄膜的基底（主要是氧化物半导体）上面溅射（从靶材或源材料上喷射出原子沉积至基底表面）一层源材料或者通过化学气相沉积而成（Janta, 2009）。在第二种结构中，将一支表面具有化学交互层的电极（通常是玻璃电极）放置在电解质溶液中，溶液中同时加入待测样品。此外，加入对电极形成一个电流回路。这种结构形式通常用于构建生物传感器。电导传感器通常成本低廉，因此得到了普遍的应用。

2.7 生物传感器

生物传感器利用生物化学反应机理来确定化学、环境（空气、土壤和水体）和生物（血液、唾液和尿液）样品中的待分析物含量。在独立装置中（见图2-5），生物传感器需要采用固定好的生物材料（可以是酶、抗体、核酸或激素）。所用的生物材料被固定在传感器上，且需要保持自身的生物活性。采用的固定方法包括：膜（如电活性聚合物）包埋、物理键合、非共价或共价结合。固定处理使得

生物材料与换能器之间相互接触。当分析物与固定的生物材料相接触时，换能器将产生一个可测量的输出，如电流、质量变化或颜色变化。也可以采用间接测量的方式，分析物与传感器材料之间发生生化反应，产生其他物质。可对反应过程中的参数，例如热量、气体（如氧气）、电子或氢离子等进行定量检测。

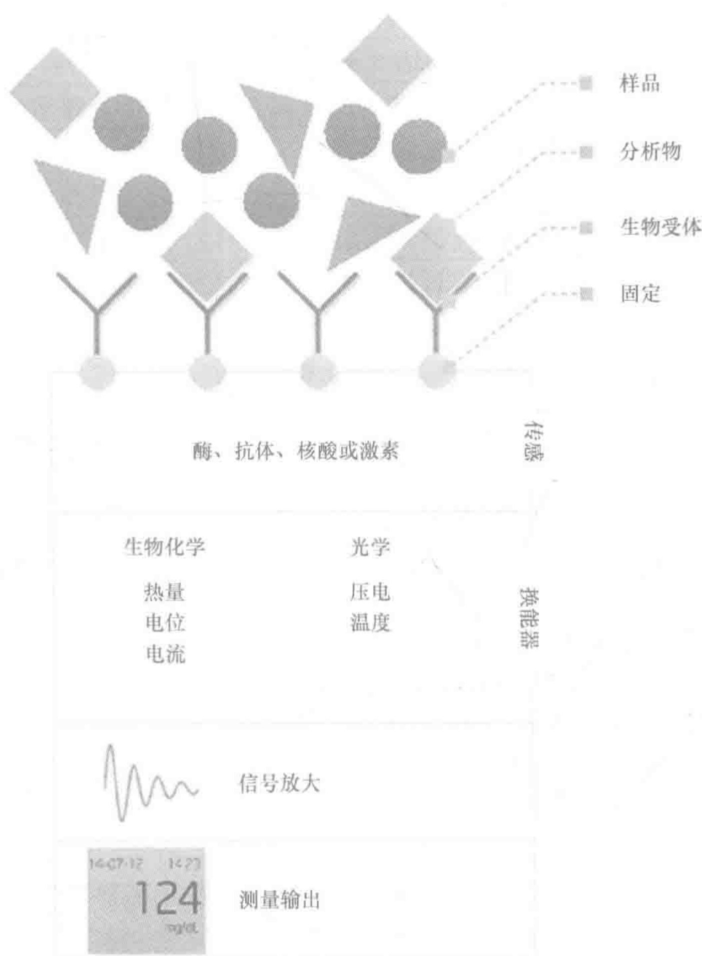


图2-5　生物传感过程示意图

自从 Yellow Springs Instruments 公司在1975年成功生产出商业葡萄糖生物传感器（Setford, et al., 2005）以来，生物传感器得到了稳定的发展。生物传感器无需处方即可购买到，常见于各种消费类应用，包括胆固醇测量、胎儿监测、排卵状况、细菌感染（如幽门螺旋杆菌）、过敏症、性传染病（STD）检测等。Global Industry Analysts 公司出具的一份报告中，估计截至2017年生物传感器市场估值约为165亿美元（PRWeb, 2012）。如今生物传感器已在医疗保健之外的领域得到了应用。主要的应用领域总结在表2-3中。

表 2-3 生物传感器的主要应用领域

领域	应　　用
医疗保健	慢性疾病管理，如糖尿病人的血糖监测
	家庭妊娠诊断和筛选；胃溃疡：幽门螺杆菌
	生物化学，如胆固醇测试
	细菌感染的检测
	急性病的评价，如前列腺癌
生物技术/发酵	酒发酵
	柠檬酸
	酿造
	酶的生产
	生物制药生产
食品质量	化学污染物的检测，如抗生素污染
	毒素检测
	病原菌检测
	激素检测，如牛奶中的激素检测
人身安全/执法/人员雇用	酒精测试
	药物测试
环境监测	污染，如测定水中粪便的大肠菌群
	农业
	水中的杀虫剂，如有机磷农药
	重金属
	激素
安保	化学战剂检测

2.7.1 生物传感器的换能器

生物传感器的信号转换过程包括传感器通过生物感受器测量的生物活性信息转换为可量化的信号，如电流、光信号或质量变化等。最常用的换能器原理是电化学、光学、压电和温度测量。

- 有四种常用的电化学检测方法应用于生物传感器（Pohanka and Skládal，2008）：
  - 电导生物传感器和阻抗生物传感器测量酶促氧化还原反应过程中的电导（电阻的倒数）的变化（Yoon，2013）；
  - 电位型生物传感器利用 ISE 和 ISFET 测量生化反应导致的电位的变化（Lee，et al.，2009）；

■ 电流型生物传感器测量生化氧化还原反应中产生的电流的变化，例如葡萄糖脱氢酶催化的葡萄糖还原反应（Corcuera, et al., 2003）；

■ 电量生物传感器测量以库仑为单位的酶促反应产生的电量，其生物医学应用包括血液样品中的葡萄糖检测（Wang, 2008；Peng, et al., 2013）。

• 在光学生物传感器中，需要在光纤上固定生物组分，该生物组分与目标检测物发生反应，形成一个复合物，该复合物具有不同的和可测量的光学性质。或者，在免疫分析中，将生物组分（如抗体）固定在检测盘中。当加入样品后，产生可测量的、可见的颜色或冷光的变化。测量方法包括光度检测和比色法检测。

• 压电生物传感器基于这样的检测原理：传感器表面的质量或弹性的变化引起压电晶体结构（如石英、硫化镉、铌酸锂（$LiNbO_3$）、氮化镓（GaN））的谐振频率的变化。压电生物传感器有两种实现方式：体声波（BAW）和表面声波（SAW）器件。给一个振荡电场施加一个声波，产生机械波，将通过表面（SAW）或基底（BAW）进行传播，直至再次转换为电场进行测量。在生物传感器的构建中，谐振频率是粘在晶体谐振器上的生物敏感膜的特征参数。生物敏感膜可以是固定的单克隆抗体类，当被分析物与抗体结合，发生质量的变化，从而引起谐振频率的变化。在生物传感器的应用中，BAW 比 SAW 更受欢迎，因为在检测过程中产生的水平剪切波在液体中的辐射能量有限，使得信噪比更高（Durmus, et al., 2008）。

• 测温和量热式生物传感器是基于对热效应的测量。许多酶促反应本身是放热的，可通过测量产生的热量来检测反应速率以及待分析物的浓度。产生的热量可以利用量热计等换能器进行测量。

2.7.2 生物传感器的主要特性

由于采用生物感受器作为敏感材料，生物传感器具有与其他传感方法不同的独特特性。相比于其他传感器，生物传感器具有优异的灵敏度和特异性。然而，它们同时也容易受到操作环境的影响，而导致耐用性较差。在大多数应用条件下，影响生物传感器的主要特性在于：

• 由于生物传感器依赖于生物组分，它们的性能稳定性会随着时间而逐渐降低；也就是说，随着时间增加，酶或抗体的活性逐渐丧失。存储条件和操作方法也在很大程度上影响其使用寿命。

• 生物传感器通常只适合单次使用。它们通常适合于及时现场应用，但目前还不适用于需要连续测量的长时监测，例如监测水体中的细菌。

• 由于受到温度、pH 值、湿度等因素的影响，生物传感器通常测量范围有限，需在特定条件因素下才能可靠运行。

• 样品准备，例如在测量前，需要制备生物样品，这会增加传感器系统的复

杂性和样品周转时间。

- 传感器污染是一个很重要的问题，尤其是在测量生物样品时，例如检测蛋白质沉积物。可以通过采用微/纳流控系统来部分解决这一问题，例如采用微量渗析来制备样品。
- 一些复合物会对传感器的读数产生干扰，尤其是对生化换能器，例如葡萄糖测量中的对乙酰氨基酚的干扰。
- 通常，生物传感器具有很高的灵敏度和特异性。

2.8 应用领域

正如前一节所介绍的，有许多种类的传感器可供研究人员和商业解决方案提供商选择。因此，对于同一种检测物，通常有不止一种传感器可实现对其测量。每种传感方法都具有自身的优缺点。针对某种应用选择传感技术的时候，需要对这些特征进行权衡考虑。诸如传感器种类、硬件选择、封装形式、应用方案等因素都需要进行考虑。下面将介绍我们所关心的应用领域对传感器提出的主要需求和挑战。

2.8.1 环境监测

城市化进程、农业集约化、工业化、对电力的需求以及气候变化等因素极大地影响了环境的洁净度。污染物和工业废物来源广泛，包括化学污染物、生物大量繁殖、重金属、气体、细菌病原体、环境噪声等，对空气、水体、土壤和周围环境产生了很大影响（Ho, et al., 2005）。

保护人类的健康和生态系统，具有最高优先级，需要快速、灵敏、耐用和可升级的传感器解决方案，对污染物（通常浓度低、分布广）进行检测。对于环境监测，虽然已有许多解决方法，但对研发新的更准确、更灵敏、更有效、可升级的传感技术的需求仍然很迫切。这将使实时制定决策、高精度检测、规范监测等方面都取得进步。

许多分析方法，尤其是细菌污染分析，仍然需要现场取样，然后送回实验室进行基于实验室方法的样品分析。尤其是对于调节型监测的采样过程，有严格的操作步骤；否则，样品和结果的完整性会受到影响。原位检测的传感器，可以有效解决这一问题，但同时也具有其他的挑战，特别是在传感器污染、灵敏度、稳定性和准确性以及抗环境干扰能力方面。目前，传感器在这些方面的应用遇到了很大的技术壁垒，必须要克服。同时，也需要维护分布在广阔地理区域的传感器网络，并证明它可以可持续性发展且与实验室分析水平相当。

1. 空气

空气污染有很多种形式，包括：二氧化硫（SO_2）、CO、NO_2、挥发性有机化合物［如苯（C_6H_6）］。这些污染来源包括车辆废气排放、发电厂、农田、工厂生

产排放等。空气污染是发达国家和发展中国家都面临的问题。化石燃料发电设备是产生空气污染的主要来源。继 2011 年日本福岛核电站爆炸事件之后（Inajima，et al.，2012），在德国和日本等国，鉴于公众对核电站的强烈抗议和政府政策的变化，对解决该类污染的需求也在增加。化石燃料的燃烧将产生颗粒物质、氮氧化物和汞（Hg），这些物质都对人类健康造成危害。与此同时，城市化的加剧和个人拥有汽车量增多，导致在大型城市如墨西哥城和里约热内卢集中车辆排放量增加，也对人类的健康造成负面影响（Schwela，2000）。

世界上的许多地方，空气质量标准和监测制度被美国国家环境保护局（EPA）等国家机构进行定期管理（例如采用美国的清洁空气法案）。对空气中的各种气体、碳氢化合物、金属和颗粒物质都进行了限制，以保障公众健康。对各种污染物浓度进行了连续检测，以确保结果符合相关规定。这些规定将在第 6 章中详细介绍。

将许多不同的传感器进行组合，可形成一个空气监测站。空气监测可以利用单一种类传感器，对单一种类气体进行检测，也可以对多种气体、颗粒物、碳氢化合物、金属等进行检测，以满足空气质量的监管要求。常规的监测利用昂贵的分析仪器，包括光谱分析，如检测二氧化硫采用的紫外荧光，以及臭氧对 254nm 波长下的紫外光的吸收（EPA，2012）。因此，在一些特定的区域，只使用了一小部分高功能、高成本的监测站。低密度使用导致产生的数据分辨率并不令人满意，特别是在高度城市化的地区，由于当地的特殊排放源、交通模式或建筑物类型等都可以影响当地的空气质量。随着低成本传感器越来越容易获取，特别是在研究界，使用高密度的传感器以获取高精度的空气质量检测，越来越引起人们的兴趣。在本书第 11 章中将详细描述这方面的应用。有多种传感器技术正用于空气质量和周围环境的检测中，包括：

- 半导体传感器用于检测大气气体（CO，CO_2，O_3，NH_3，CH_4，NO_2）、环境温度、湿度和大气压力（Fine，et al.，2010；Kumar，et al.，2013）。

- 光学和光纤传感器用于检测环境温度和湿度、大气气体（SO_2，NO_2，O_2，H_2，CH_4，NH_3）（Diamond，et al.，2013，Zhang，et al.，2010，Borisov，et al.，2011）。

- 电化学传感器用于检测大气气体（O_3，CO，H_2S，H_2，NO，NO_2，SO_2）（Mead，et al.，2013，Bales，et al.，2012，Kumar，et al.，2011，Korotcenkov，et al.，2009）。

2. 水体

对于清洁水的需求日益增加，受到全球范围内对于饮用水和工业用水的需求驱动，目前已经产生了对于水质检测的关键需求。类似于空气质量，相关国家机构（如 EPA）和地缘政治机构（如欧盟）已经制定了适用于公共供水系统的严格管理条例。这些都具有法律强制效力，促使了对更可靠的传感技术的研发需求，从而对

不同的水质参数进行监测，并需要满足一定的灵敏度要求。传感器技术需要提供实时或近似实时的数据，以确保任何水质异常变化对人类健康或制造业的影响是最小化的。这方面监控的缺失可能会导致如巴黎水事件等后果。在该公司的瓶装水中发现了苯，一种已知的致癌物质，导致在整个美国范围内，它们的所有存货从商店货架召回（James，1990）。在水质管理中，可以对大量参数进行监测。具体的参数种类取决于应用领域，如饮用水、工业用水（例如饮料制造）或是工业废水、雨水的监测等。通常有三大类参数：物理参数（浊度、温度、电导率）、化学参数（pH值、溶解氧、金属浓度、硝酸盐、有机物）和生物参数（生物需氧量，细菌含量）。许多传感器已进入商业化应用或正在进行水质参数检测的可行性评估，包括：

- 电化学传感器（pH 值（ISFET），铵，电导率）：
  - ■ 电流型传感器（氯、生化需氧量（BOD）、溶解氧、硝酸盐）；
  - ■比色传感器（有机物、杀虫剂，如甲基对硫磷、氯）。
- MEMS 传感器（溶解氧、NH_3）。
- 光学传感器（溶解氧、浊度、Ca、金属离子）。
- 基于生物材料的生物传感器（细菌，毒素）。

特异性试剂的使用在许多水分析应用中也较普遍。基于试剂的方法不是传统的传感器，它们可用于检测许多关键的水质参数，例如硝酸盐。试剂与水样中的分析物反应，导致水体颜色的变化，可用光学检测方法进行测量（Czugala，et al.，2013，Cogan，et al.，2013）。除了水质监测，MEMS 压力传感器等也被用于对配水基础设施进行检测，以改进系统的控制和管理能力。智能水网格和预测模型的概念，已经开始在研究领域相继涌现。用于配水基础设施检测的传感器，有助于通过压力的下降来识别设施泄漏，从而通过流路改道减少水的损失。另一个具有吸引力的研究领域是基于预测模型的水质监测。这种方法是基于水质、环境传感器和计量传感器的数据融合来预测未来水质的潜在变化。

3. 声音（噪声污染）

随着社会的城市化进程，人们生活距离更近，噪声和噪声污染成为一个大问题。噪声对生活品质具有显著的影响，从影响人的情绪到产生实质性的心理或生理影响。噪声污染可被描述为，影响人们日常生活和活动的、不被人需要的声音。噪声污染是短暂的或连续的。常见的来源包括汽车、铁路、航空、工业、邻居和娱乐噪声。噪声污染监测正变得日益规范化。欧盟的 2002/49/EC 号指令文件要求成员国定期提供在超过 25 万居民的城市区域的噪声水平的精确映射地图，并使数据对公众开放（Santini，et al.，2008）。

例如，西班牙公司 Libelium，提供噪声污染检测服务，作为智能城市无线传感器网络平台的一部分。最近，随着智能手机的快速普及使用，市民引导的城市环境中的噪声水平检测已经得到了普及。智能手机内的应用程序利用手机的内置麦克风

(MEMS) 收集噪声数据，并将其标定位置信息（从手机 GPS 坐标获取），通过 3G 或 Wi-Fi 上传至网络。市民可以利用这些数据绘制噪声分布地图，以此影响城市规划者做出相应改变，从而提高城市生活质量（Maisonneuve，et al.，2009）。

4. 土壤

大量的测量土壤质量特征的手持式仪器已经很常用了。其中使用最广泛的是测量金属污染的野外便携式 X 射线荧光（FP-XRF）检测仪。该技术的一个重要优点在于，它几乎不需要样品制备，如酸消解等。然而，该技术在体积浓度分析中具有局限性，在这类分析中，样品中可能存在高浓度元素（Radu，et al.，2013）。其他常用的传感器包括温度和湿度测量计，以及测量土壤强度的透度计。这些仪器的检测性能是非常准确的，同时它们的局限性在于单次测量只能提供单一的测量参数。对于其他需要更频繁地测量数据的应用（如园艺），目前的传感器是能满足使用要求的。

当采用传感器来对土壤进行检测和分析时，人们通常对土壤的物理、化学和生物成分更感兴趣。这类数据具有广泛的应用，包括农业、污染和地球物理监测。主要的测量参数包括含水量（电容器、中子湿度计、时域传输（TDT）、时域反射计（TDR））、温度、pH 值、有机物含量（光反射）和氮含量。

土壤污染物可以分为：微生物（如粪便大肠菌群）、放射性物质（如氚）、无机物（如 Cr）、合成有机物（如有机磷农药）和挥发性有机化合物（如苯）。在土壤污染物检测的应用中，传感器具有两类作用：一是利用专门的传感器检测特定的污染物；二是在土壤清洁过程中监测土壤的物理特性，包括水含量（地表水污染）和土壤温度（当采用真菌处理去除土壤污染物时，土壤温度是非常重要的参数）。

土壤的地球物理监测采用了许多应用于农业中的物理传感器的检测数据。这种方法用于堤坝监测中，以确定其结构的完整性。运动传感器（MEMS 加速度计）和 GPS 传感器也经常使用。其他典型的应用包括监测易发生滑坡的地区、可能发生沉降问题的建筑物、垃圾填埋场渗滤液和沼气等。

2.8.2　医疗

在医疗保健领域，传感器的应用范围包括生理监测（如心率）、筛查（如血生化）以及跌倒风险评估等。应用于医疗保健领域的传感器通常由实施特定医疗用途的公司研制而成，并且需要经过适当的监管机构（如美国食品药品管理局（FDA））的批准、登记等。在家庭和社区中，远程医疗、远程监控以及移动医疗相关传感器的应用，使得远程监测和慢性病（包括糖尿病、慢性阻塞性肺疾病（COPD）、充血性心力衰竭（CHF））病人管理成为可能。在医院和初级卫生保健设施中，传感器的使用更侧重于医学筛查和诊断，例如床边血液化学测试、电解质水平测试、血气浓度分析。用于胆固醇监测、验孕、食物过敏测试、DNA 测试的非处方诊断传感器的市场正在逐渐增长。在许多情况下，这些非处方传感器对诊断

的准确性没有严格要求，它们提供一个指导结果，在寻求正式的临床护理干预前可以帮助用户进行决策。

加快医疗传感器应用的关键在于，需要研发低成本的微系统传感器技术，在某些情况下，需要低成本、低功耗微控制器（MCU）和无线电收发功能。这些设备已经开启了小型、可靠、耐用、准确、低功耗的传感器解决方案的发展。在临床医疗保健领域，传感器的应用包括：

- 筛查和诊断：生化和光学传感器用于床旁监测和诊断，包括血液和组织分析（Yang，et al.，2013，Girardin，et al.，2009）。生物传感器可用于确诊细菌感染、确定生物样品中的药物、激素和蛋白质水平（Swensen，et al.，2009，McLachlan，et al.，2011，Wang，et al.，2011）。
- 运动：穿戴式无线传感器，如加速度计和陀螺仪，可以用来确定平衡和跌倒风险问题，并监测临床干预的影响。运动传感器可用于假肢替代品的评价（Arami，et al.，2013）。它们还用于监测中风康复中有针对性的体育锻炼的效果（Uzor，et al.，2013，Shyamal，et al.，2012）。传感器也被印刷在织物上进行运动检测（Wei，et al.，2013，Metcalf，et al.，2009）。
- 生理：这类传感器用于测量关键健康生理指标，例如心电图（ECG/EKG）和血压（Mass，et al.，2010，Brown，et al.，2010）。红外传感器用于非接触式温度计（Buono，et al.，2007）。
- 肌肉骨骼：穿戴式传感器，如肌电图测试，可用于评估肌肉问题和组织损伤（Spulber，et al.，2012，Reaston，et al.，2011）；传感器直接集成到织物中应用于康复检测，也已经有文献报道（Shyamal，et al.，2012）。
- 成像：低成本 CCD 和超声传感器可用于医疗成像（Jing，et al.，2012，Ng，et al.，2011）。智能药丸可用于肠道成像（McCaffrey，et al.，2008）。

2.8.3 保健

健康通常被描述为保持智力、身体和精神之间的平衡，给予一个人幸福的感觉。美国国家健康研究所的定义是（Institute，2013）

> 健康是多维的、整体性的，包括生活方式，心理和精神幸福，以及环境。

传感器在健康领域的应用涵盖了广泛的范围，包括休闲体育活动水平的监测，睡眠质量，家庭个人安全等。

1. 监测休闲活动

随着人们越来越意识到健康的重要性，以前只在临床应用的常用传感器具有了更大的市场。这种传感器被消费者用于跟踪健康计划的成果，例如，预防肥胖，包括健身和提高活动水平。穿戴式设备，如心率和血压检测器，集成的活动监测器，以及脉搏血氧仪越来越多地被用于这一新兴领域。这些传感器辅以标准的活动监测

传感器，如穿戴式计步器，可以配合应用软件为用户提供活动分析，并鼓励目标导向行为。对于软/硬件混合，有各种各样的解决方案，包括 Nike + Fuelband 智能运动手环，它具有三个加速度计、用户自定义目标设定和日常活动的可视化。

飞思卡尔等公司已经开始提供基于硅器件的多传感器和健康监测的解决方案（Freescale，2012）。随着这些传感器成本的降低，随着它们集成至消费类电子设备中，尤其是智能手机，这些传感器的应用将得到极大的增加。应用程序 Nike + iPhone 是一个由欧洲统一（CE）认证的传感器应用的很好例子（Apple，2012）。随着新标准的出现，在一些机构如 Continua 健康联盟（Alliance，2010）和不断发展的电子爱好者社区的推动作用下，建立新的消费类应用将变得更加容易。

2. 人身安全

健康的另一要素是人身安全，尤其是在家里。烟雾探测器和 CO 传感器早已投入使用。半导体或电化学传感器常被用于住宅 CO 检测。电化学快速检测和响应（IDR）传感器经常被紧急人员使用，例如，消防队员要快速决定建筑物内是否含有危险浓度的 CO。烟雾探测器通常是基于两种传感器中的一种：电离探测器或光电探测器。两种类型都是有效的，但是响应特性不同。电离探测器对有火焰的火灾具有更快的响应，而光电探测器对于产生更多烟雾的火灾（如电气故障导致的阴燃火灾或家具引发的火灾）具有更快的响应。电离探测器的缺点是会产生误报，因为它们对正常烹饪产生的小烟雾颗粒具有一定敏感性。在现代家庭中，烟雾探测器（电离型和光电型）通常采用交流供电，并用电池作为备用电源（Helmenstine，2013），因此消除了电量耗尽带来的问题。

3. 活动和位置监测

由于具有更好的医疗保健、营养、生活方式，全球人口的平均寿命在增加，让老年人尽可能长时间地待在家里，这一需求正越来越受到关注。基于传感器的应用可以通过在家中采用位置监测来实现这一点。位置信息可以采用 PIR 传感器测量，可以结合机器学习算法和其他来源的数据，如温度和湿度等，来确定一个人的健康状态，并在需要时触发干预措施。在居民有轻度认知障碍的情况下，可以在门的出口处，采用传感器（如磁接触传感器）对房子的周边进行监测，以确定居民是否离开家，并在必要时通知其他家庭成员。环境遥感可以通过穿戴式传感器（如 MEMS 加速度计和陀螺仪）进一步增强功能，用于检测是否跌倒等问题。

GPS 追踪器和其他传感器如智能手机的加速度计，具备新的个人定位 - 跟踪功能。这类传感器可用于娱乐目的，为慢跑者提供实时的速度、位置、高度和方向信息，也可以应用于人身安全检测，例如父母利用 GPS 追踪器确定孩子或者认知障碍的老年人的位置。然而，这种方法也是有局限性的，尤其是在监测活动的类型和强度时，如区分在平地上行走和爬台阶。

2.9 传感器特性

传感器提供一个对物理、化学或生物待测量产生响应的输出，通常需要一个电信号输入来进行控制；因此，与电子设备类似，传感器的特性用传感器规格或相关数据表进行说明。要想真正了解传感器，以及测量同一参数的不同传感器之间的真正区别，有必要了解传感器的性能特点。不幸的是，对于这些特点没有一个标准的定义，传感器社区的不同团体采用的特性名称是不同的，这取决于传感器的应用领域。传感器制造商发布的丰富的性能特点参数，使得这一混乱现象变得更复杂，给潜在用户确定他们应用所需的性能以及如何使用这些传感器造成了困难。本节将介绍这些特性，尽量采用它们最普遍的名称，也可以参考在其他相关应用中可替换的名称。

传感器的特性分为系统特性、统计特性和动态特性。Bently 将系统特性定义为"那些可以用数学或图形方法精确量化的特性"；将统计特性定义为"那些无法确切量化的特性"；将动态特性定义为"元件对一个突然的输入变化产生响应的方式"（Bently，1995）。

2.9.1 检测范围

检测范围是一个静态特性，顾名思义，它描述的是输入或输出的最小值与最大值。检测范围这一术语通常以下面的方式出现在数据表中：

- 满刻度量程，描述待测量的最大值和最小值之间的范围。全范围输入通常被称为跨度。满量程输出（FSO）是指最大输入和最小输入产生的输出信号之间的代数差。跨度（或动态范围）描述的是在不造成不可接受的误差水平的前提下，传感器可以施加的输入值的最大值和最小值。
- 工作电压范围，描述的是传感器可以施加的最小和最大输入电压。施加超过这个范围的输入电压可能会对传感器造成永久性的损坏。

2.9.2 传递函数

传感器特性描述了待测量和输出电信号之间的关系。这种关系可以用数值表、图形或者数学公式表示。进行单个校准的较昂贵的传感器，甚至可能提供一个经过认证的校准曲线。如果这个关系不随时间变化，就被称为是传感器的传递函数。用于描述传递函数的数学公式通常如下所示：

$$S = F(x)$$

式中，x 为待测量，S 为传感器产生的电信号。一个传递函数完全由单个公式表述，是非常罕见的，因此常采用实际传递函数的泛函逼近。

1. 线性传递函数

最简单的传递函数是线性传递函数，具有如下形式：

$$S = A + Bx$$

式中，A 是传感器偏移；B 是传感器斜率。传感器偏移是当不施加被测量时，传感器产生输出值。线性传递函数的斜率等于传感器的灵敏度，灵敏度将在后面介绍。在实际中，很少有真正的线性传感器，但如果在特定检测范围内，待测量和输出值之间的拟合曲线接近线性直线，那么传感器可被认为具有线性特性。理想的直线，即传递函数的线性逼近，通常采用下面的方法进行绘制（见图 2-6）：

- 终点法：在传感器的上限和下限值之间绘制理想直线。该方法通常没有最佳拟合法准确。
- 最佳拟合法：也被称为独立线性度，理想直线可以任何形式进行放置，只要能使它与器件的实际传递函数之间的偏差最小化。由于它与实际数据拟合最好，或者说与实际数据的偏差最小，该方法被传感器制造商最常采用，用于描述他们的传感器性能。最小二乘法是最常用的拟合方法。这种统计方法对大量不同点的值进行取样并计算出最佳拟合值。

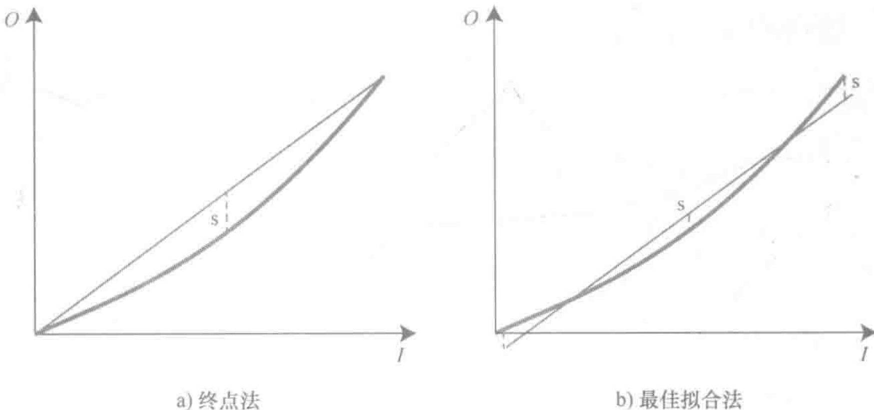


图 2-6　采用终点法和最佳拟合法绘制的理想直线。实际数据与理想直线之间的非线性采用虚线（s）表示

2. 线性化

线性传递函数具有很多优点。第一，从传感器的输出电信号计算待测量值，以及从待测量值预测传感器的输出电信号，都比较简单。第二，传感器偏移和斜率特性很容易从传递函数中获得。第三，非理想特性，如非线性和迟滞效应，可通过与线性传递函数相比进行定义。非线性传感器的输出可以采用硬件或软件对其“线性化”，从而利用线性传感器的优势（van der Horn, et al., 1998）。传统的基于硬件的线性化方法通常需要利用手动校准和精密电阻来实现需要的精度。现代智能传感器采用低复杂度和低成本的数字技术来产生线性输出。这些技术利用智能传感器集成的微控制器和存储器存储每个传感器的工厂校准结果，从而方便其进行数字线性化和校准。微控制器可以通过寻找补偿值或利用查表法查出实际的线性输出

值，从而对传感器结果进行纠正。如果存储量有限，则采用校正系数，而不是整个查找表，来构建一个线性化的输出。

3. 非线性传递函数

一些传递函数并不能很好地近似为线性传递函数。但它们可以使用其他数学函数进行逼近（Fraden，2010），包括：

- 对数函数：$S = A + B\ln(x)$
- 指数函数：$S = Ae^{kx}$
- 幂函数：$S = A + Bx^k$

式中，x 是待测量；S 是传感器产生的电信号；A 和 B 是系数；k 是幂指数。如果先前介绍的函数都不能用于描述传感器的传递函数，那么可以采用多项式函数。二阶和三阶多项式可以用以下的传递函数进行表达：

- 二阶多项式：$S = Ax^2 + Bx + C$
- 三阶多项式：$S = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D$

三阶多项式比二阶多项式能更好地拟合传感器的传递函数。但是，当传感器输入范围较窄时，二阶多项式比三阶多项式拟合的结果更准确。

2.9.3 线性和非线性

非线性，在数据表中常被称为线性，是实际测量曲线和理想直线之间的差异。由于非线性可以随着输入-输出曲线而变化，采用一个被称为最大非线性度的值，来表达数据表中的线性特性。最大非线性度通常表达为跨度的百分比。非线性度，通常受到环境变化的影响，例如温度、振动、噪声水平和湿度等。重要的一点是，需要注意数据表中所列的非线性度对应的环境条件，尤其当所列的环境条件与实际应用条件不同时。

2.9.4 灵敏度

灵敏度是指产生单位变化的输出，需要改变多少输入值。如果传感器的响应是线性的，灵敏度在传感器的测量范围内是恒定的，并且等于拟合直线的斜率（见图2-7）。理想的传感器具有显著的、恒定的灵敏度。如果传感器响应是非线性的，灵敏度将随着传感器的测量范围而发生变化，可通过 S 对 x 求导（dS/dx）来计算。

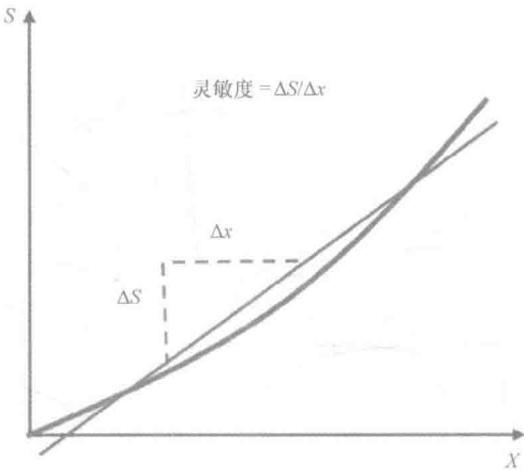


图 2-7 传感器灵敏度

常见的灵敏度相关的问题包括截止区和饱和区。截止区是一个特定的

输入信号范围，在该范围内，传感器对输入不产生响应，或者对输入不敏感，输出的信号可能保持某一确定值（通常为零值）。截止区也是用跨度的百分比来表示。饱和值是指当输入值达到某一值以后，传感器的输出值不再发生变化。

2.9.5　环境影响

传感器的输出可能会受到外界环境的影响，就像被测量值本身发生变化一样。这些环境变化会改变传感器的响应，从而影响其检测范围、灵敏度、分辨率和偏移等。数据表指定的特性是在某一固定条件下的特性（如固定的温度、湿度、输入电压条件等）。如果传感器要在这些条件以外工作，强烈建议在使用条件下对传感器进行重新校准。

2.9.6　输入修正

通过输入修正可以改变传感器的线性灵敏度。传感器施加的电压 V_s，是一个常见的输入修正的例子，输入电压经过修正调节之后，传感器的输出电压也随之调节，这反过来又修正了传感器的分辨率和灵敏度。

2.9.7　输入干扰

干扰传感器的输入，可以改变传感器的拟合直线的截距。输入干扰常见的一个例子就是温度，因为它改变了传感器的零偏。温度影响传感器输出的例子，如图2-8所示。

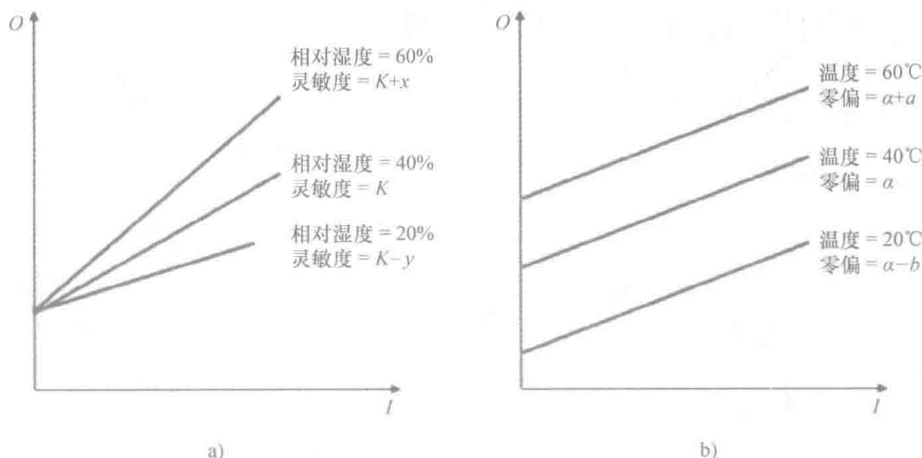


图2-8
a）输入修正（湿度）对传感器灵敏度 K 的影响　b）输入干扰（温度）对传感器的影响

2.9.8　迟滞

对于一个给定的输入，传感器的输出可以不相同，取决于这个输入值是增加的

还是降低的，这种现象被称为迟滞。用以描述对于一个给定的输入值，上升测量和下降测量产生的输出值之间的差异，如图 2-9 所示。类似于非线性，迟滞也随着输入 - 输出曲线而变化；因此采用最大迟滞值来描述这一特性。这个值通常表示为传感器跨度的百分比。当传感技术依赖于某些特定材料的压力时（如应变计），迟滞现象经常发生。松紧带和磁路在重复使用后，可能永远不会回到原来的初始位置。随着使用时间的增加，这可能导致未知偏移，从而影响器件的传递函数。

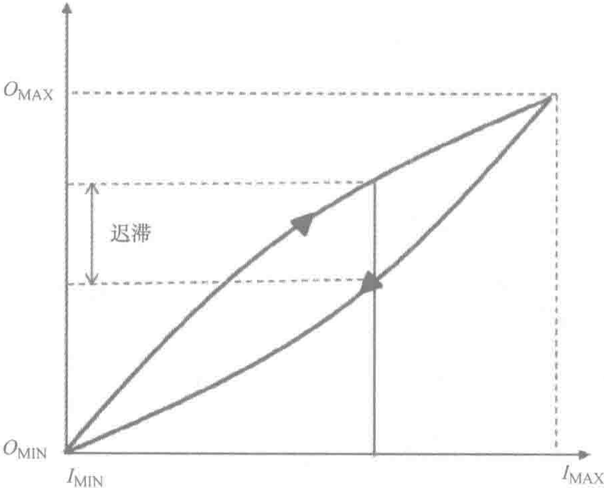


图 2-9　迟滞曲线（示意了上升测量和下降测量中传感器响应的差异）

2.9.9　分辨率

分辨率，也称为辨别力，是指传感器能检测到的被测量的最小变化量。现代传感器的分辨率差别很大，所以在为某种应用选择传感器之前，了解该应用所需的分辨率很重要。如果传感器的分辨率过低，传感器将无法检测到被测量的微小变化。但是，也完全没有必要选择分辨率过高的传感器，因为这样的传感器较昂贵。阈值通常用于描述触发传感器产生可检测输出的最小被测量，但如果传感器的增量是从零开始测量，阈值也可用于描述分辨率。

2.9.10　准确度

准确度是指传感器产生一个与被测量的真实值接近的输出结果的能力。确切地说，它描述了实际输出信号和理想输出信号之间的最大期望误差。准确度往往是相对于传感器的跨度而言的。例如，一个温度计，可以保证在它的跨度的 5% 之内是准确的。由于准确度是与被测量的真实值相关的，它可以使用以下公式中的相对误差百分比进行量化：

$$\text{相对误差百分比} = \frac{(\text{测量值} - \text{真实值})}{\text{真实值}} \times 100$$

2.9.11　精度

精度有时会与准确度混淆。图 2-10 显示了两者的主要差异。精度描述的是传感器连续产生同一输出的能力。因此，有可能有的传感器准确度很好，但精度很差

（例如一个温度计，测量63°F的温度，得出的读数为62～64°F），或者，有的传感器精度很高，但准确度很差（例如一个温度计，测量63°F的温度，得出的读数总是70°F）。由于精度与测量的重复性有关，所以它可以利用下面的公式表示为标准偏差百分比：

$$标准偏差百分比 = \frac{标准偏差}{均值} \times 100$$

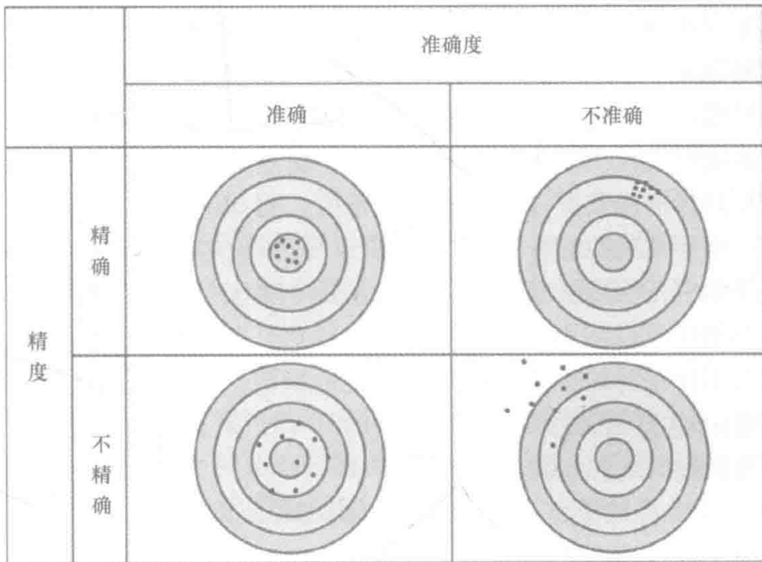


图2-10 准确度和精度的区别，以飞镖作比喻进行示意

2.9.12 误差

误差是测量值与真实值之间的差异，其中，真实值是一个绝对标准或约定标准的参考。有两种形式的误差：系统误差和随机误差。

1. 系统误差

系统误差是指重复性的误差，可以通过补偿方法进行校准，如反馈、滤波和校准等（Wilson，2004）。造成这种误差的因素包括：

- 输入干扰，通过改变传感器的零偏引入误差。
- 输入修正，如湿度，通过改变传感器输入、输出信号之间的关系引入误差。
- 由于老化或长期暴露在紫外线等条件下，传感器的化学结构或机械应力的变化，导致传感器的增益和零偏产生漂移。这种传感器和相关组件的逐渐恶化，导致传感器输出从原来的校准状态发生改变。这种误差可通过频繁的重校准进行补偿。
- 干扰，也称为加载误差，会发生在传感器本身改变了被测量的情况下。一个简单的例子，在流速传感器中，传感器可能会中断液体的流动，产生错误的读数。在化学传感器中，测量干扰与样品中的其他物质及目标检测物的竞争过程

有关。

- 信号衰减，有时甚至信号丢失，可能发生在信号通过某种介质的时候。
- 人们可以在无意中引入一些系统误差，包括不正确定位带来的视差、采用不正确的校准仪器带来的零点误差、分辨率误差（参考设备的分辨率太大）。人为因素误差通常称为“操作误差”。

2. 随机误差（噪声）

随机误差（也称为噪声），是一个不含有测量信息的信号组分。信号质量被量化表示为信噪比（SNR），也就是真实信号幅度与噪声的标准偏差的比率。高信噪比意味着信号质量好。噪声可以通过无被测量输入时记录的信号进行测量，或者记录一个已知的被测量几次，然后从测量信号中减去已知的真实信号，即得到噪声。信号幅度的相对标准偏差被用于衡量检测精度，而 SNR 与之成反比。因此，噪声信号也就是一个不精确的信号。

在分析化学中，检测限（LOD）和定量限（LOQ）与噪声有一个特别的关系。LOD 是指在检测中可以与不含该物质样品（噪声）相区分的最低物质量。LOQ 是指物质存在与不存在时的检测差异可以量化的极限。LOD 可以量化为噪声标准偏差的 3 倍，而 LOQ 被定义为噪声标准偏差的 10 倍。真正的随机误差（白噪声）呈高斯分布。随机性的来源包括：

- 被测对象本身的噪声（如粗糙表面的高度）。
- 环境噪声（如麦克风捕获的背景噪声）。
- 传动噪声。

3. 误差带

误差带是在一次测量中结合了多种传感器特性（包括非线性、迟滞作用和分辨率），并确保输出在理想直线的 ±*h* 范围内。*h* 值通常是一个百分比，例如 ±5%；也可以是一个值，例如 ±5℃。图 2-11 说明了分布在传感器输出的理想直线周围的误差带的概念。它们有利于减少用户在设计应用的时候要考虑的特性数量；也有利于制造商，因为有了误差带，制造商不需要对每个传感器的每个特性进行单独的测试和校准。

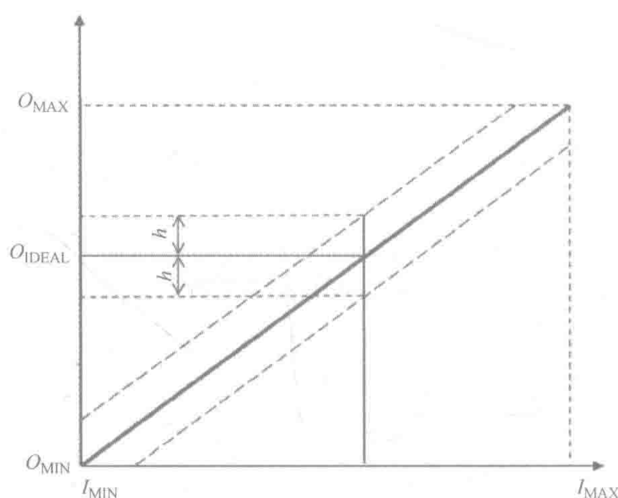


图 2-11　分布在理想直线周围的误差带

2.9.13　统计特性

统计特性是不能用公式或图形进行确切表达的特性。这些特性描述了采用单个或多个传感器进行大量测试数据的总结。在数据表中最常用的统计特性就是可重复性和公差。

2.9.14　可重复性

可重复性是指当给予相同输入条件下，传感器产生相同输出的能力。缺乏可重复性通常由环境的随机波动或操作错误导致。

2.9.15　公差

公差描述的是由于微小的随机制造差异导致的一批相似元件的输出的差异。如果制造商报出的公差是 ±5%，那么在这个范围之外的传感器将不允许被出售。

2.9.16　动态特性

动态特性是传感器的时变特性。在某些应用中，传感器的输入在较长时间内都保持不变，那么这些情况下的传感器的动态特性就不那么重要。动态特性可以分为零阶、一阶和二阶系统。传感器数据表中最常用的动态特性是响应时间和动态线性度。

1. 响应时间

当传感器的输入变化时，它们的输出并不是立即发生改变。传感器从之前的输出状态转变为新的正确的输出值（在一个公差带范围内）所需要的时间，被称为响应时间（见图 2-12）。公差带的定义是基于传感器种类、应用或传感器设计者的偏好的。它可以是一个数值，例如新的正确输出值的 90%。常利用一阶系统中的时间常数来对响应时间进行定义（Fraden，2010）。时间常数是指在特定条件下，传感器达到稳定输出值的 63.2% 所需要的时间。可以通过对响应曲线进行单指数曲线拟合，进而估计时间常数的值。

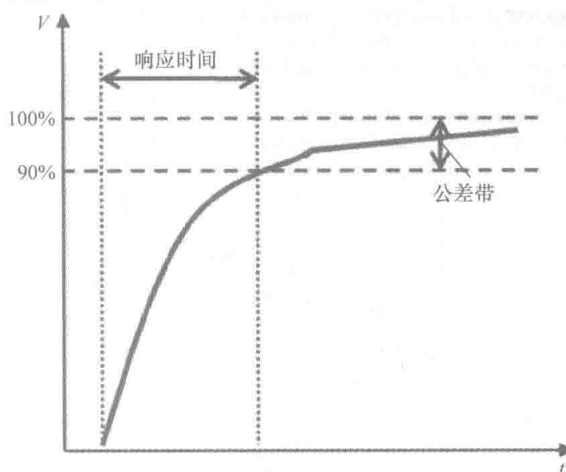


图 2-12　传感器的响应时间，公差带为 90% ~100%

2. 动态线性度

传感器的动态线性度是衡量其跟随输入参数快速变化的能力。幅值失真特性、

相位失真特性和响应时间是决定动态线性度的重要因素。

2.10 小结

传感器和换能器这两种说法通常是可以互换的，对于一个给定的应用，两种器件都被封装在传感系统中。正如本章中所描述的，有很多种类的传感器技术可用于测量物理、化学和生物量。本章简要概述了各种技术——机械、光学、半导体和生物传感，也明确指出了各自的优缺点。介绍了关键的传感领域，以及各种各样的传感技术该如何应用于这些领域，以解决日益增长的城市化、全球老龄化、污染和气候变化带来的问题。概述了管理和调控在驱动传感器应用于空气监测和符合环保要求的应用的重要性。最后，对传感器的特性进行了定义和说明，以方便用户简化阅读数据表的过程，以及比较不同传感器之间的性能差异。

参考文献

Fraden, Jacob, *Handbook of Modern Sensors*, 4th ed. New York: Springer, 2010.

Jones, Deric P., *Biomedical Sensors*, 1st ed. New York: Momentum Press, 2010.

Chen, K. Y., K. F. Janz, W. Zhu, and R. J. Brychta, "Redefining the roles of sensors in objective physical activity monitoring," *Medicine and Science in Sports and Exercise*, vol. 44, pp. 13-12, 2012.

Sutherland, John W., *An Introduction to Sensors and Transducers*, Last Update: 2004, http://www.mfg.mtu.edu/cyberman/machtool/machtool/sensors/intro.html

ANSI, Americian National Standards Institute, "ISA S37.1-1975 (R1982)," ed, 1975.

NRC, (National Research Council) - Committee on New Sensor Technologies: Materials Applications Commission on Engineering Technical Systems, *Expanding the Vision of Sensor Materials*: The National Academies Press, 1995.

AALIANCE. (2010). *Ambient Assisted Living Roadmap*, Broek, Ger Van Den, Filippo Cavallo, and Christian Wehrman, Eds., vol. 6, IOS Press, http://ebooks.iospress.nl/volume/aaliance-ambient-assisted-living-roadmap

Khanna, Vinod Kumar, *Nanosensors: Physical, Chemical, and Biological*. Boca Raton: CRC Press, 2012.

Wang, Ping and Qingjun Liu, *Biomedical Sensors and Measurement*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.

Fink, Johannes Karl, "Mechanical Sensors," in *Polymeric Sensors and Actuators*, Hoboken, Massachusetts, Wiley-Scrivener, 2012, pp. 131-138.

Patranabis, D, *Sensors and Transducers*, 2nd ed. New Delhi: PHI Learning Pvt Ltd, 2004.

Kyowa, "What's a Strain Guage", http://www.kyowa-ei.co.jp/eng/, 2013.

Kasukawa, Yuji, *et al.*, "Relationships between falls, spinal curvature, spinal mobility and back extensor strength in elderly people," *Journal of Bone and Mineral Metabolism*, vol. 28, (1), pp. 82-87, 2010.

Bohannon, Richard W., "Literature reporting normative data for muscle strength measured by hand-held dynamometry: A systematic review," *Isokinetics and Exercise Science*, vol. 19, (3), pp. 143-147, 2011.

PCB Piezotronics[1]. "MEMS Accelerometers", http://www.pcb.com/Accelerometers/MEMS.asp, 2013.

PCB Piezotronics[2]. "Sensing Technologies used for Accelerometers", 2013. http://www.pcb.com/Accelerometers/Sensing_Technologies.asp, 2013.

Nanogloss. "What is a MEMS Accelerometer?", http://nanogloss.com/mems/what-is-a-mems-accelerometer/#more-190, 2009.

Nasiri, Steven, "A Critical Review of MEMS Gyroscopes Technology and Commericalisation Status", InvenSense, Santa Clara, http://invensense.com/mems/gyro/documents/whitepapers/MEMSGyroComp.pdf, 2013.

Cadena, Richard, "Electromechanical Systems," in *Automated Lighting: The Art and Science of Moving Light in Theatre, Live Performance, Broadcast and Entertainment*, Burlington, MA, Elsevier, 2013.

Fried, Limor. *PIR Motion Sensors*, Last Update: April 27th 2012, http://www.ladyada.net/learn/sensors/pir.html

EngineersGarage. "Infrared Sensors or IR Sensors", http://www.engineersgarage.com/articles/infrared-sensors?page=3, 2012.

Udd, Eric, "Fiber Optic Sensors - An Introduction for Engineers and Scientists," in *Pure and Applied Optics* vol. 2013, Udd, Eric and William B. Spillman, Eds., 2nd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

Lee, Byeong Ha, *et al.*, "Interferometric Fiber Optic Sensors," *Sensors* vol. 12, pp. 2467-2486, 2012.

Morendo-Bondi, Maria C., Guillermo Orellana, and Maximino Bedoya, "Optical Sensor-- Industrial, Environmental and Diagnostic Applications," in *Chemical Sensors and Biosensors* Wolfbeis, O. S., Ed., Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2004, pp. 251-278.

Baldini, Francesco and Anna Grazia Mignani, "Biomedical Fibre Optic Sensors," in *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*, López-Higuera, José Miguel, Ed., Chichester, John Wiley & Sons Ltd, 2002, pp. 705-722.

Nihal, Kularatna and B. H. Sudantha, "An Environmental Air Pollution Monitoring System Based on the IEEE 1451 Standard for Low Cost Requirements," *Sensors Journal, IEEE*, vol. 8, (4), pp. 415-422, 2008.

Wetchakun, K., *et al.*, "Semiconducting metal oxides as sensors for environmentally hazardous gases," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 160, (1), pp. 580-591, 2011.

Knott, Barry. *Semiconductor Technology - Personal Breathalyzer*, Last Update: January 10th 2010, `http://ezinearticles.com/?Semiconductor-Technology---Personal-Breathalyzers&id=3511961`

Gómez-Pozos, Heberto, *et al.*, "Chromium and Ruthenium-Doped Zinc Oxide Thin Films for Propane Sensing Applications," *Sensors*, vol. 13, (3), pp. 3432-3444, 2013.

Fraden, Jacob, "Temperature Sensors," in *Handbook of Modern Sensors*, Springer New York, 2010, pp. 519-567.

Coey, J. M. D., "Magnetic Sensors," in *Magnetism and Magnetic Materials*, Cambridge University Press, 2010, pp. 516-521.

Sze, Simon M. and Kwok K. Ng, "Magnetic Sensors," in *Physics of Semiconductor Devices*, Hoboken, New Jersey, Wiley, 2007, pp. 758-764.

CHEM EUROPE.COM. "Charge-coupled device", `http://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Charge-coupled_device.html`, 2013.

AppliedSensor, "Metal Oxide Semiconductor (MOS) Sensors", `http://www.electronics-base.com/images/stories/General_descriptions/Gas%20sensors/Metal_Oxide_Semiconductor_(MOS).pdf`, 2008.

Gyorki, John R., *Designing with Semiconductor Temperature Sensors*, Last Update: 2009, `http://www.sensortips.com/temperature/designing-with-semiconductor-temperature-sensors/`

CAPGO. "Introduction to Semiconductor Temperature Sensors", `http://www.capgo.com/Resources/Temperature/Semiconductor/Semi.html`, 2010.

Racz, Robert. *A Novel Contactless Current Sensor HEV/EV and Renewable Energy Applications*, Last Update: 28th March, 2011, `http://www.digikey.com/us/es/techzone/sensors/resources/articles/a-novel-contactless-current-sensor-hev-ev.html`

Eren, Halit, "Magnetic Sensors," in *Wiley Survey of Instrumentation and Measurement*, Dyer, Stephen A., Ed., New York, Wiley, 2001, pp. 40-60.

EE TImes. "Non-Contact Fluid Sensor - detects liquid through transparent tubing", `http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1294625`, 2004.

Refaat, Tamer F., *et al.*, "Infrared phototransistor validation for atmospheric remote sensing application using the Raman-shifted eye-safe aerosol lidar," *Optical Engineering*, vol. 46, (8), pp. 086001-086001-8, 2007.

Adami, Andrea, Severino Pedrotti, Cristian Collini, and Leandro Lorenzelli, "Development of a pH Sensor with Integrated Reference Electrode for Cell Culture Monitoring," in *Sensors*. vol. 162, Baldini, Francesco, Arnaldo D'Amico, Corrado Di Natale, Pietro Siciliano, Renato Seeber, Luca De Stefano, Ranieri Bizzarri, and Bruno Andò, Eds., Springer New York, 2014, pp. 481-485.

Guth, U., F. Gerlach, M. Decker, W. Oelßner, and W. Vonau, "Solid-state reference electrodes for potentiometric sensors," *Journal of Solid State Electrochemistry*, vol. 13, (1), pp. 27-39, 2009.

Kokot, Maciej, "Measurement of sub-nanometer molecular layers with ISFET without a reference electrode dependency," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 157, (2), pp. 424-429, 2011.

Guth, Ulrich, Winfried Vonau, and Jens Zosel, "Recent developments in electrochemical sensor application and technology — a review," *Measurement Science and Technology*, vol. 20, (4), 2009.

Banica, Florinel-Gabriel, "Potentiometric Sensors," in *Chemical Sensors and Biosensors: Fundamentals and Applications*, Chichester, UK, John Wiley & Sons, 2012, pp. 165-216.

Wang, Joseph and Kim Rogers, "Electrochemical Sensors for Environmental Monitroing: A Review of Recent Technology", U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Environmental Monitoring and Support Laborator, `http://www.clu-in.org/download/char/sensr_ec.pdf`, 1995.

Andoralov, Viktor, Sergey Shleev, Thomas Arnebrant, and Tautgirdas Ruzgas, "Flexible micro(bio)sensors for quantitative analysis of bioanalytes in a nanovolume of human lachrymal liquid," *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 405, (11), pp. 3871-3879, 2013.

Carroll, S., M. M. Marei, T. J. Roussel, R. S. Keynton, and R. P. Baldwin, "Microfabricated electrochemical sensors for exhaustive coulometry applications," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 160, (1), pp. 318-326, 2011.

Janta, Jiří, *Principles of Chemical Sensors*, 2nd ed. Heidelberg: Springer, 2009.

Setford, Steven J. and Jeffrey D. Newman, "Enzyme Biosensors," in *Microbial Enzymes and Biotransformations*. vol. 17, Barredo, Jose Luis, Ed., Totowa, New Jersey, Humana Press, 2005, p. 30.

"Global Market for Biosensor in Medical Diagnostics to Reach US$16.5 Billion by 2017, Accoring to New Report by Global Industry Analysts, Inc", `http://www.prweb.com/releases/medical_biosensors/environmental_biosensors/prweb9242715.htm`, 2012.

Yoon, Jeong-Yeol, *Introduction to Biosensors - From Circuits to Immunosensors*. New York: Springer, 2013.
Lee, Chang-Soo, Sang Kyu Kim, and Moonil Kim, "Ion-Sensitive Field-Effect Transistor for Biological Sensing," *Sensors*, vol. 9, (9), pp. 7111–7131, 2009.
Corcuera, José I. Reyes De and Ralph P. Cavalier, "Biosensors," in *Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering*, Heldman, Dennis R., Ed., New York, Marcel Dekker Inc., 2003, p. 121.
Wang, Joseph, "Electrochemical Glucose Biosensors," *Chemical Reviews*, vol. 108, (2), pp. 814–825, 2008.
Peng, Bo, *et al.*, "Evaluation of enzyme-based tear glucose electrochemical sensors over a wide range of blood glucose concentrations," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 49, (0), pp. 204–209, 2013.
Durmus, N. Gozde, *et al.*, "Acoustics Based Biosensors," in *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*, Li, Dongqing, Ed., Heidelberg, Springer, 2008, pp. 15–24.
Ho, Clifford K., Alex Robinson, David R. Miller, and Mary J. Davis, "Overview of Sensors and Needs for Environmental Monitoring," *Sensors*, vol. 5, pp. 4–37, 2005.
Inajima, Tsuyoshi, Takashi Hirokawa, and Yuji Okada. *Japan Draws Curtain on Nuclear Energy Following Germany*, Last Update: 2012, http://www.bloomberg.com/news/2012-09-14/japan-draws-curtain-on-nuclear-energy-following-germany.html
Schwela, Dietrich, "Air Pollution and Health in Urban Areas," *Reviews on Environmental Health*, vol. 15, (1–2), pp. 13–42, 2000.
Watt, Louise. *China Pollution: Cars Cause Major Air Problems in Chinese Cities*, Huffington Post, http://www.huffingtonpost.com/2013/01/31/china-pollution-cars-air-problems-cities_n_2589294.html, 2013.
Wee, Sui-Lee and Adam Jouran. *In China, public anger over secrecy on environment*, Last Update: March 10th 2013, http://www.reuters.com/article/2013/03/10/us-china-parliament-pollution-idUSBRE92900R20130310
EPA, "List of Designated Reference and Equivalent Methods," vol. MD-D205-03, ed. Research Triangle Park, North Carolina: National Exposure Reseach Laboratory, 2012, p. 60.
Fine, George F., Leon M. Cavanagh, Ayo Afonja, and Russell Binions, "Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring," *Sensors*, vol. 10, (6), pp. 5469–5502, 2010.
Kumar, A., H. Kim, and G. P. Hancke, "Environmental Monitoring Systems: A Review," *Sensors Journal, IEEE*, vol. 13, (4), pp. 1329–1339, 2013.
Diamond, Dermot, Fiachra Collins, John Cleary, Claudio Zuliani, and Cormac Fay, "Distributed Environmental Monitoring," in *Autonomous Sensor Networks*. vol. 13, Filippini, Daniel, Ed., Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 321–363.
Zhang, C., W. Zhang, D. J. Webb, and G. D. Peng, "Optical fibre temperature and humidity sensor," *Electronics Letters*, vol. 46, (9), pp. 643–644, 2010.
Borisov, Sergey M., Roman Seifner, and Ingo Klimant, "A novel planar optical sensor for simultaneous monitoring of oxygen, carbon dioxide, pH and temperature," *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 400, (8), pp. 2463–2474, 2011.
Mead, M. I., *et al.*, "The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks," *Atmospheric Environment*, vol. 70, pp. 186–203, 2013.
Bales, E., *et al.*, "Citisense: Mobile air quality sensing for individuals and communities Design and deployment of the Citisense mobile air-quality system," in *Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth), 2012 6th International Conference on*, 2012, pp. 155–158.
Kumar, A., I. P. Singh, and S. K. Sud, "Energy efficient air quality monitoring system," in *Sensors, 2011 IEEE*, 2011, pp. 1562–1566.
Korotcenkov, Ghenadii, Sang Do Han, and Joseph R.Stetter, "ChemInform Abstract: Review of Electrochemical Hydrogen Sensors," *ChemInform*, vol. 40, (22), 2009.
James, George. *Perrier Recalls Its Water in U.S. After Benzene Is Found in Bottles*, The New York Times, New York, http://www.nytimes.com/1990/02/10/us/perrier-recalls-its-water-in-us-after-benzene-is-found-in-bottles.html, 1990.
Czugala, Monika, *et al.*, "CMAS: fully integrated portable centrifugal microfluidic analysis system for on-site colorimetric analysis," *RSC Advances*, vol. 3, (36), pp. 15928–15938, 2013.
Cogan, Deirdre, *et al.*, "Integrated flow analysis platform for the direct detection of nitrate in water using a simplified chromotropic acid method," *Analytical Methods*, vol. 5, (18), pp. 4798–4804, 2013.
Santini, Silvia, Benedikt Ostermaier, and Andrea Vitaletti, "First experiences using wireless sensor networks for noise pollution monitoring," presented at the Proceedings of the workshop on Real-world wireless sensor networks, Glasgow, Scotland, 2008.
Maisonneuve, Nicolas, Matthias Stevens, Maria E. Niessen, Peter Hanappe, and Luc Steels, "Citizen Noise Pollution Monitoring," presented at the 10th International Digital Government Research Conference, Puebla, Mexico 2009.
Radu, Tanja, *et al.*, "Portable X-Ray Fluorescence as a Rapid Technique for Surveying Elemental Distributions in Soil," *Spectroscopy Letters*, vol. 46, (7), pp. 516–526, 2013.
Yang, Chin-Lung, *et al.*, "Design and evaluation of a portable optical-based biosensor for testing whole blood prothrombin time," *Talanta*, vol. 116, (0), pp. 704–711, 2013.
Girardin, Céline M., Céline Huot, Monique Gonthier, and Edgard Delvin, "Continuous glucose monitoring: A review of

biochemical perspectives and clinical use in type 1 diabetes," *Clinical Biochemistry*, vol. 42, (3), pp. 136–142, 2009.

Swensen, James S., *et al.*, "Continuous, Real-Time Monitoring of Cocaine in Undiluted Blood Serum via a Microfluidic, Electrochemical Aptamer-Based Sensor," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 131, (12), pp. 4262–4266, 2009.

McLachlan, Michael J., John A. Katzenellenbogen, and Huimin Zhao, "A new fluorescence complementation biosensor for detection of estrogenic compounds," *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 108, (12), pp. 2794–2803, 2011.

Wang, Xuefeng, Ming Zhao, David D. Nolte, and Timothy L. Ratliff, "Prostate specific antigen detection in patient sera by fluorescence-free BioCD protein array," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 26, (5), pp. 1871–1875, 2011.

Arami, A., A. Vallet, and K. Aminian, "Accurate Measurement of Concurrent Flexion-Extension and Internal-External Rotations in Smart Knee Prostheses," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 60, (9), pp. 2504–2510, 2013.

Uzor, Stephen and Lynne Baillie, "Exploring & designing tools to enhance falls rehabilitation in the home," presented at the Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Paris, France, 2013.

Shyamal, Patel, Park Hyung, Bonato Paolo, Chan Leighton, and Rodgers Mary, "A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 9, (1), pp. 21–21, 2012.

Wei, Yang, Russel Torah, Kai Yang, Steve Beeby, and John Tudor, "Design optimized membrane-based flexible paper accelerometer with silver nano ink," *Applied Physics Letters*, vol. 103, (7), 2013.

Metcalf, Cheryl D., *et al.*, "Fabric-based strain sensors for measuring movement in wearable telemonitoring applications," presented at the IET Conference on Assisted Living, London, UK, 2009.

Mass, Fabien, Julien Penders, Aline Serteyn, Martien van Bussel, and Johan Arends, "Miniaturized wireless ECG-monitor for real-time detection of epileptic seizures," presented at the Wireless Health 2010, San Diego, California, 2010.

Brown, L., *et al.*, "A low-power, wireless, 8-channel EEG monitoring headset," in *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2010 Annual International Conference of the IEEE*, 2010, pp. 4197–4200.

Buono, Michael J, Amy Jechort, Raquel Marques, Carrie Smith, and Jessica Welch, "Comparison of infrared versus contact thermometry for measuring skin temperature during exercise in the heat," *Physiological Measurement*, vol. 28, (8), pp. 855–859, 2007.

Spulber, I., *et al.*, "Frequency analysis of wireless accelerometer and EMG sensors data: Towards discrimination of normal and asymmetric walking pattern," in *Circuits and Systems (ISCAS), 2012 IEEE International Symposium on*, 2012, pp. 2645–2648.

Reaston, P., M. Reaston, and B. Kuris, "Wireless Diagnostics," *Pulse, IEEE*, vol. 2, (2), pp. 20–26, 2011.

Jing, Meng, Liang Dong, and Song Liang, "Compressed sensing photoacoustic tomography in vivo in time and frequency domains," in *Biomedical and Health Informatics (BHI), 2012 IEEE-EMBS International Conference on*, 2012, pp. 717–720.

Ng, J. H. G., *et al.*, "Design, manufacturing and packaging of high frequency micro ultrasonic transducers for medical applications," in *Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), 2011 IEEE 13th*, 2011, pp. 93–98.

McCaffrey, C., O. Chevalerias, C. O'Mathuna, and K. Twomey, "Swallowable-Capsule Technology," *Pervasive Computing, IEEE*, vol. 7, (1), pp. 23–29, 2008.

National Wellness Institute. "The Six Dimensions of Wellness", `http://www.nationalwellness.org/?page=Six_Dimensions`, 2013.

Freescale, "Medical Applications - User Guide", `http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/user_guide/MDAPPUSGDRM118.pdf#page=44`, 2012.

Apple. "Nike + iPod - Meet Your New Personnal Trainer", `http://www.apple.com/ipod/nike/`, 2012.

Continua Health Alliance. "Health & Wellness - Fitness goals will be more easily attainable", `http://www.continuaalliance.org/connected-health-vision/health-and-wellness.html`, 2010.

Helmenstine, Anne Marie. *How Do Smoke Detectors Work? - Photoelectric & Ionization Smoke Detectors*, Last Update: 2013, `http://chemistry.about.com/cs/howthingswork/a/aa071401a.htm`

Bently, John P., *Principles of Measurements Systems*, 3rd ed. Singapore: Longman, 1995.

van der Horn, Gert and Johan Huijsing, "Calibration and Linearization Techniques," in *Integrated Smart Sensors: Design and Calibration*, Springer, 1998.

Wilson, Jon S., *Sensor Technology Handbook*. Burlington, MA: Newnes, 2004.

第3章　传感器关键技术：硬件和软件概述

如前面章节中所述，传感器是利用各种不同的传感技术测量一系列的化学、生物和物理量。传感技术是通过转换过程产生一个输出信号，该信号能够被处理加工并以某种方式传递给人或另一装置完成有用的工作。能够完成数据采集、处理和在数据总线上输出完整的测量结果的传感器被称为智能传感器。智能传感器的这些特点可以进一步扩展后加入智能传感器系统，扩展技术包括无线电通信、采样、远程管理和扩展附件等。硬件和软件的结合才能使传感器实现信号调节、数据处理、转换、存储和显示。本章将介绍传感器和传感器系统设计中关键的硬件和软件特点。

3.1　智能传感器

智能传感器和普通传感器系统的区分并不是非常明确。智能传感器一般将模拟接口电路、集成模数转换器（Analog - to - Digital Converter，ADC）的微控制器和输入输出（Input/Output，I/O）总线聚合在一起，实现传感技术和换能器的功能聚合（Huijsing，2008）。除了上述系统需求，智能传感器还需要有自校准功能、测量补偿功能（用于克服基线漂移、温度等环境变化）和自身状况评估功能。此外，一些智能传感器可能还具备基于固件的信号处理能力、数据验证和多参数传感能力（Mathas，2011）。智能传感器的这些特征一般都是通过新型的微控制器（Micro-Controller Unit，MCU）驱动的，MCU 可以用于数字信号处理（Digital Signal Processing，DSP）、ADC、基线校正、数据处理、数据存储支持、电源管理和接口功能（内部通信等）。

智能传感器的各个部分一般集成在同一块印制电路板（Printed Circuit Board，PCB）上。这种聚合可以提高系统的性能和可靠性，同时也降低测试成本。小型化的形式使得检测平台的设计更为灵活，这一点在众多应用中都非常重要，比如在体生命体征监测。但是，集成 PCB 形式的智能传感器预付开发成本可能非常高，大体积的智能传感器相对经济实惠。因为 PCB 的封装体积很小，设计者需要仔细考虑电路板排布对传感器工作性能的影响。局部加热效应和射频（Radio Frequency，RF）干扰等问题都需要在设计时考虑到，以免影响传感器性能。

微机电系统（MEMS）制造技术的发展可以有效降低传感器的生产成本，预计到2017年，智能传感器市场的消费额将达到67亿美元（PRWeb，2012）。随着智能传感器的尺寸进一步缩小，应用领域一定会进一步扩大，如植入式生物传感器将

成为新的应用领域（Córcoles et al.，2013）。

3.2　传感器系统

传感器系统通过增加功能来扩展智能传感器的可用性，比如通信功能（有线和无线）、结果显示、样本获取和预处理、附件和配件、远程管理和安全性。一般根据应用需求对系统的可用性进行针对性的组合。图 3-1 阐明了高级传感器系统的结构。Meijer 将传感器系统描述为传感功能与不同接口的组合，接口包括微控制器、存储器、数字和模拟 I/O，以及用于聚合系统中的附件和配件（Meijer，2008）。

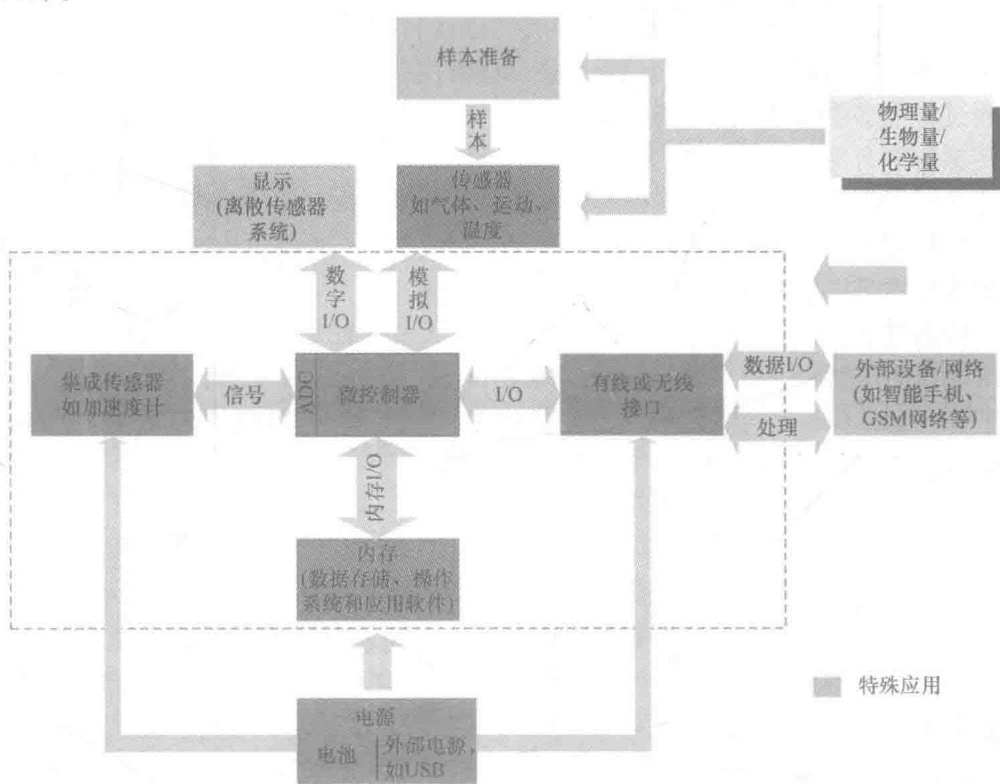


图 3-1　高级传感器系统结构

传感器系统由多个功能层组成，包括传感和换能器、信号处理（过滤、调节、模数转换）、数据完整性检验、数据处理、信号传输和显示。在某些案例中，还需要远程装置管理。在多传感器系统中，通过比较多个传感器的读数可以提高单个传感器的准确度，优化单个传感器的性能。比如，温度漂移补偿就可以根据其他传感器的读数确定，并提升当前传感器的准确度。多传感器系统的这种能力可以使得系统适应环境，并对环境变化做出补偿，有利于系统保持较高鲁棒性（Hunter et

al.，2010）。

对于健康保健等应用领域，传感器系统的物理属性是重要的筛选标准，尤其是对于可穿戴装置。这些属性包括系统的固有重量、物理尺寸、附件类型、传感器组装方式以及防水性（防止生物体液渗入系统）。在移动应用中，传感器系统的重量是非常重要的指标，例如用在智能手机或震动系统中，传感器的重量会直接影响测量的准确性（Pecht，2008）。

3.3 传感器平台

传感器平台是智能传感器的子集。像智能传感器一样，传感器平台也以微控制器、有线/无线接口和内存为特征。但传感器平台不是针对某种特殊的应用，它可以聚合多种外部传感器，并利用程序接口让微控制器完成特定的功能。这类平台可以通过将传感器硬件和执行器连接到平台的数字或模拟接口而快速实现功能。大多数传感器平台都拥有集成开发环境（Integrated Ddevelopment Environment，IDE）和样品应用代码，两者联合工作可以实现对传感器和执行器的编程。但是，这种灵活性同时也带来一定弊端：传感器平台尺寸一般较大，价格也比智能传感器高，并且很多时候用户并不同时需要平台上的所有功能。

传感器平台在业余爱好者、设计师、研究人员和教育工作者中间非常流行。存在多种商用传感器平台，如 Parallax Basic Stamp，Netmedia's BX－24，Phidgets 和 MIT's Handyboard。在健康、社会福利和环境领域使用最广泛的是 Arduino，Shimmer 和智能手机。

3.3.1 Arduino I/O 板

Arduino 公司（www.arduino.cc）是 2005 年在意大利成立的，除了专业人员，他们还启用了艺术家、设计师和业余爱好者，共同搭建样机平台。Arduino I/O 板通常被称作“Arduino”，但是，“Arduino”在此处不仅指开源硬件传感器平台，还包括开源软件和活跃的用户群。

传统的 Arduino I/O 板是围绕 Atmega MegaAVR 微控制器家族开发的（Atmel，2013）。例如，Arduino UNO R3 板（见图 3-2）是基于 Atmel ATmega328 的（www.atmel.com）。Atmel ATmega328 是一款八位的 ATM 内核微控制器。多数官方 Arduino I/O 板都有四个扩展接插件，可以连接 Arduino 扩展板来扩充 I/O 板的功能。目前有上百种 Arduino 扩展板（http：//shieldlist.org/）可以为 Arduino I/O 板提供无线电和传感功能。Arduino 的开源特性是它最突出的特征。Arduino 开放了它所有硬件的 CAD 设计文件，允许开发者用于个人或商业用途。这使得经销商们纷纷销售官方的 Arduino 或 Arduino 兼容的传感器平台和扩展板。Intel 公司生产的 Galileo 板是 Arduino 认证的产品线之一，这种板的功能在第 4 章有介绍。

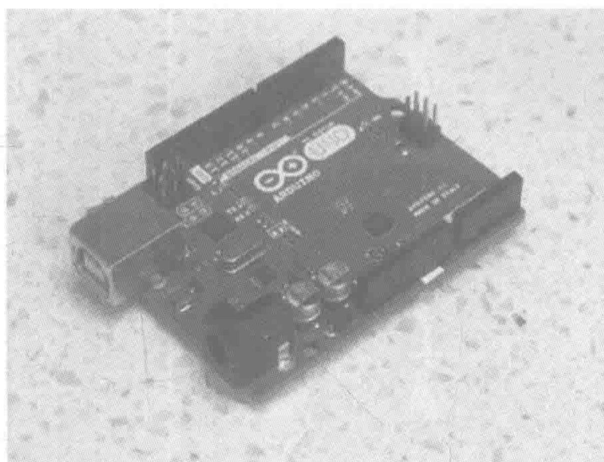


图 3-2　Arduino UNO R3 板

Arduino I/O 板的微控制器编程是通过开源的 Arduino 编程语言和开源的 Arduino 集成开发环境实现的。也可以用 Atmel 公司的 AVR – studio 或其他软件环境编写。

3.3.2　Shimmer

Shimmer 是一种无线传感器平台，可以实时获得和传输传感器数据，或在获得数据后存入 microSD 卡。Shimmer 是一种成熟的传感器平台，面向的对象是研究者、临床工作者和科学家，这些人希望获得传感器的数据，却不想过多地考虑传感器的电子设计、供能和组装的问题。Shimmer 的小尺寸外形使得它在穿戴式产品中应用广泛，同时在环境传感领域也被应用（Burns et al.，2010）。

Shimmer 是主板的名字，如图 3-3 所示，使用的是 MSP430 微控制器，两个无线电收发装置（802.15.4 和蓝牙）、一个 microSD 接口、一个三轴加速度传感器和一个 20 针的 Hirose 连接件。Shimmer 主板就是一个智能传感器，能实现基本的动作传感、数据捕获、处理和无线传输功能。Shimmer 的传感能力可以通过连接特定的 Shimmer 子板来扩展，也可以连接 Shimmer 样机来支持其他传感器的连接。Shimmer 提供多种子板，可以用于复杂动作传感、生命特征和生理参数传感、环境传感等。

Shimmer 可以通过两种方式编程。一是 Shimmer 提供针对不同传感器模块的预编译固件镜像，可以通过 Shimmer 引导装载器或通用串行总线（Universal Serial Bus，USB）接口下载到 Shimmer 中。二是利用开源的 TinyOS 模块编写固件代码，固件开发者可以从 code.google.com 上免费获取 TinyOS 库。在应用方面，使用 Matlab、LabView、C#或者 Android 模块可以将 Shimmer 接入 PC 或者智能手机，这些模块可以在 Shimmer 的官网（www.shimmersensing.com）上获取；Shimmer 也可以接



图 3-3 Shimmer 运动传感器（主板、子板和电池封装在一个定制的传感器外壳里）
（图片由 Shimmer Research 授权使用）

入 PAMSys 生理活动监测平台。

3.3.3 智能手机和平板电脑

智能手机和平板电脑包含多种集成传感器，操作系统利用这些传感器来提升用户体验。这些传感器一般包括动作和位置传感器（加速度传感器、陀螺仪、磁力计和压力传感器）、光传感器（环境光传感器、接近传感器、图像传感器和显示传感器）、硅麦克风和多种环境传感器。主要的移动端操作系统（iOS，Android 和 Windows 8）提供了传感器框架，允许开发者在他们的应用程序中方便地获取实时数据流。"Run Keeper" 是一种非常流行的移动端应用程序，它能通过智能手机的嵌入式传感器实现多种用途（http：//runkeeper. com）。

相比于其他的传感器平台，这类移动装置在多方面具有优势。传感器被聚合到一种已然存在且使用频繁的技术中，使得用户的接受度非常高。高性能的微控制器结合丰富的内存可以支持长时间的复杂数据分析。同时，将传感器框架聚合到软件开发环境中大大地简化了开发步骤。

但是，使用移动设备实现传感也有一些缺点，因为这种传感器的结构使其细节和控制变得抽象化，你很难像使用分离的传感器那样能够获得细节的信息。此外，传感功能只是设备的辅助功能，当有更高优先级的任务出现时，操作系统会暂停或终止传感功能。最后，Android 和 Windows 8 可以运行在多种硬件配置上，也就是说，程序员无法控制传感器的规格，也无法控制传感器框架的数据转换方式。实际上，保证传感器数据准确的唯一方式就是通过无线连接方式在手机外部扩展一个分

立的传感器。移动装置也可以用作内部和外部传感器的聚合工具（在第 4 章中详细讨论）。

3.4 智能传感器的微控制器

我们已经定义了智能传感器是具有传感能力，并且可以在单个程序包中实现计算、I/O 和通信能力的传感设备。大部分智能传感器都是由微控制器（MCU）驱动的，MCU 包含模数转换、数据存储支持、电源管理和接口功能（外部通信等）。下面我们详细介绍现代 MCU 的关键组成部分，以及其结构如何实现智能传感器。

"微型处理机"、"微型计算机"和"微控制器"经常被混淆，但这几个词其实各自有不同的含义。微处理器是中央处理器（Central Processing Unit，CPU），在一个单独的芯片上实现。实际上，"微处理器"的"微"就是指这种单芯片实现方式。在 1970 年以前，CPU 都是由多块芯片或多个离散装置连接构成的，还没有聚合成现在这种单芯片结构。

如图 3-4 所示，微型计算机是包含微处理器和外围设备（I/O 接口、数据存储器、程序存储器、中断控制和定时器）的计算装置。微型计算机对于小型计算机不是必须的，只需要一个微处理器就可以了。比如，含有英特尔 i5 内核的个人计算机就可以被视为一个微型计算机。

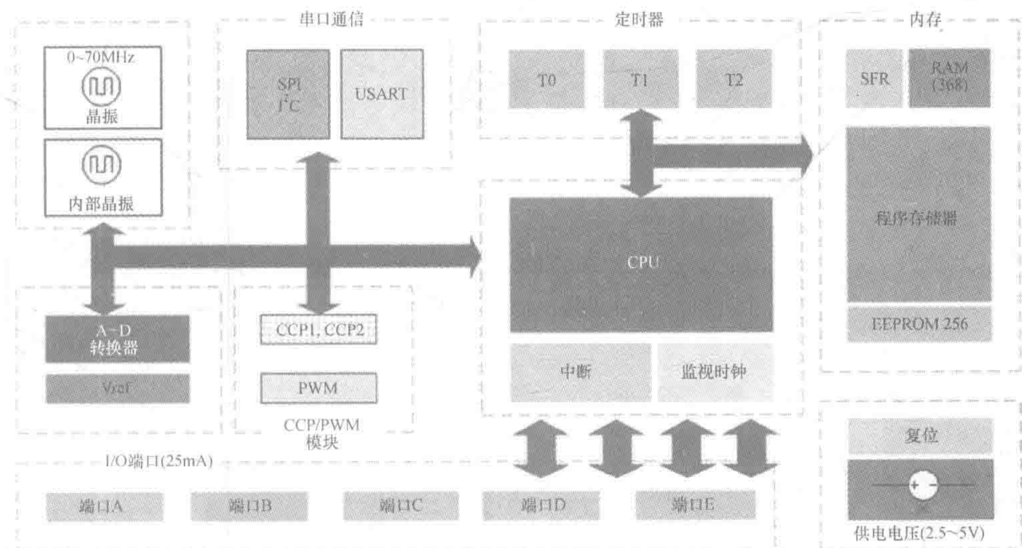


图 3-4　微控制器结构框图

微控制器被设计用来完成某些输入/输出关系明确的特殊任务。比如微波炉、电话和洗碗机，也用于本书提到的传感应用中。既然这些应用都非常明确，对于资源的需求（例如可随机访问存储器（Random Access Memory，RAM）、只读存储器

（Read Only Memory，ROM）和I/O口）也就可以提前确定，一般低成本的微控制器就可以满足这些需求。微控制器一般都是一个系列的，如Atmel MegaAVR系列就使用了同种CPU搭配不同的输入/输出配置。选择微控制器时，需要先选择微控制器系列，然后选择系列中与你的输入/输出和内存要求最匹配的一款。

3.4.1 CPU

CPU的设计原则远比本节介绍的要广泛和复杂得多，但本节只是提供一个关于CPU的简单概述，并介绍它在微控制器中的应用。

一个CPU主要包括以下五个部分：

- 算术逻辑单元（Arithmetic and Logic Unit，ALU）：ALU负责实现数据计算功能。基础的CPU只含有一个ALU，用于加法、减法和逻辑运算。更复杂的CPU含有多个ALU，可以进行浮点运算。如果MCU的内部总线是16位总线，并且ALU可以实现16位操作，这样的MCU就被称为16位微控制器。16位MCU精度和性能都优于8位MCU，但低于32位MCU。
- 控制单元（Control Unit，CU）：CU控制指令进出处理器和ALU的运行。
- 寄存器阵列：寄存器阵列是一些小的内部存储器单元，用于快速存储和取回数据和指令。如图3-5所示，所有的处理器都包含至少一个程序计数器、一个指令寄存器、一个加法器、一个存储地址寄存器和一个栈指针寄存器。

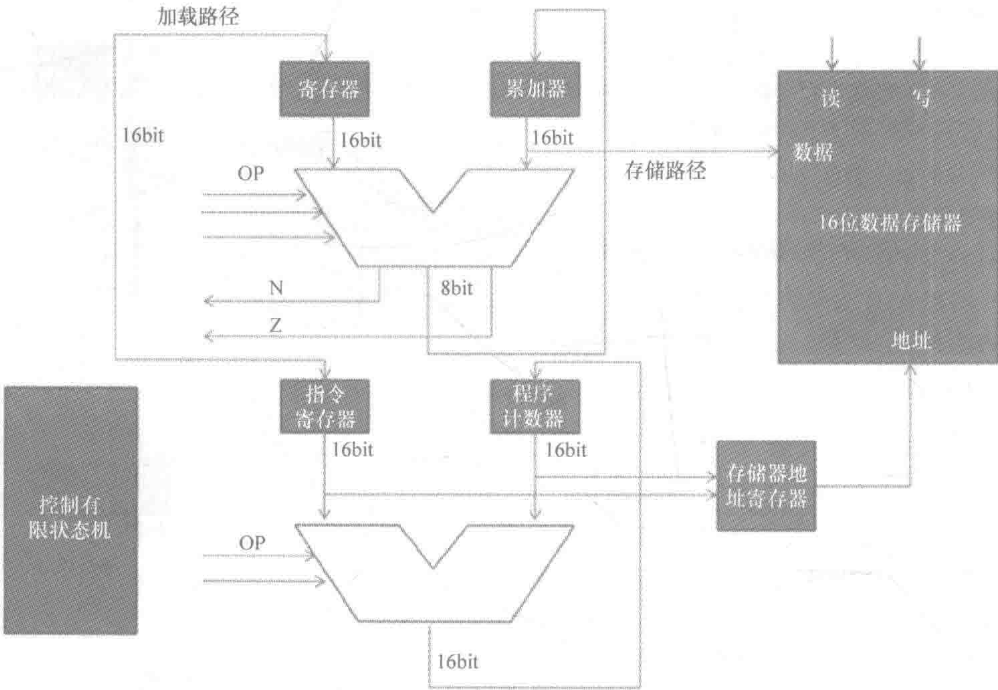


图3-5 普林斯顿结构CPU的寄存器视图

• 系统总线：系统总线由数据总线、地址总线和控制总线组成，用于在处理器、存储器和外部设备间传递数据。地址总线携带特殊位置的地址。一个 n 位宽度的地址总线可以寻址到 2^n 个地址。例如，16 位的地址总线可以寻址到 $2^{16} = 65536$ 个地址，即 64K 存储器。数据总线在 CPU 和存储器之间、CPU 和 I/O 设备之间传送数据。控制总线从 CPU 获取指令并从设备返回状态信号。

• 存储器：尽管存储器不是 CPU 的实际组成部分之一，但它是 CPU 操作的重要部分，用于存储数据和将要执行的程序。

指令集结构（Instruction Set Architecture，ISA）是指处理器能理解的指令的列表。不同的处理器有不同的指令集。每条指令都包含操作符和操作数。操作符描述的是 CPU 需要进行的操作；操作数描述的是操作需要的数据。程序员一般不直接使用指令集书写程序，但他们的代码执行之前要被翻译成这种形式以便 CPU 可以理解。

处理器一般分为精简指令集计算机（Reduced Instruction Set Computer，RISC）或复杂指令集计算机（Complex Instruction Set Computer，CISC）。RISC 指令数目少，指令长度固定，采用单独的硬线控制在单个机器周期内实现。RISC 结构包含多种寄存器，减少了从外部存储器取指令的次数。RISC 处理器的设计比 CISC 简单，芯片体积小，针脚数少，能耗非常低。总之，RISC 是一种生产成本较低的结构。

CISC 有更大的指令集，指令不具备标准字长，执行时间不同，结构复杂。CISC 允许在 ALU 和数据传输指令中读取存储器。多数 CISC 结构的指令集非常相似，允许程序员使用一种指令来代替其他简单的指令。随着 RISC 和 CISC 相互借鉴对方的优点，两者的区别越来越小。现代的典型微控制器一般有 RISC 内核，但也可以通过使用片上编译器支持一些 CISC 特征。

1. 寄存器

寄存器是小型的 RAM 单元，长度为 1 ~ 2B。一般有通用型和专用型两种寄存器。通用型寄存器用于临时存放 ALU 调度计算结果，比外部存储器有更快的读取速度。特殊功能寄存器（Special Function Register，SFR）的功能是由厂家定义的。这些寄存器的位直接与内部电路相连，如模数转换器和通用同步/异步串行接收/发送器（Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter，USART），可以直接控制这些电路。SFR 寄存器和它们的位可以在软件中命名。

2. 存储器

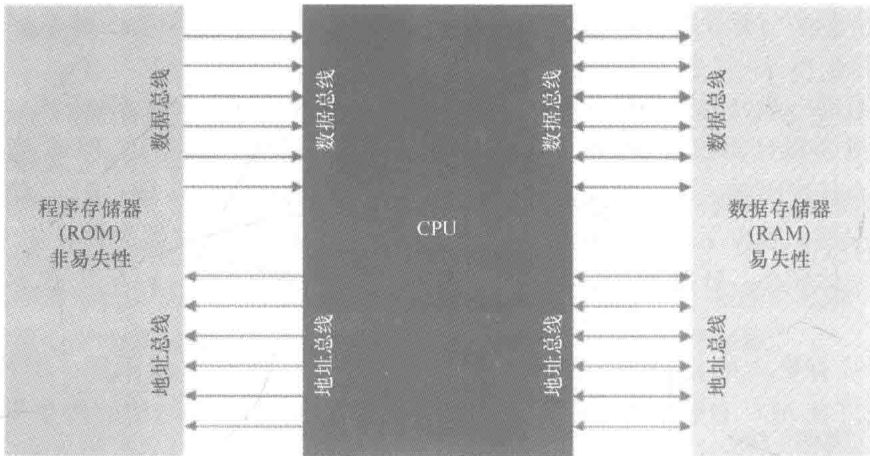
微控制器包含三种类型的存储器：RAM、ROM 和电可擦除可编程只读存储器（Electrically Erasable Programmable Read - Only Memory，EEPROM），它们通过地址总线与 CPU 相连。

• RAM 存储程序执行期间可变的数据。RAM 中的数据一般在微控制器断电后丢失，所以不能用于存储在多个用电周期间用到的程序和设置。

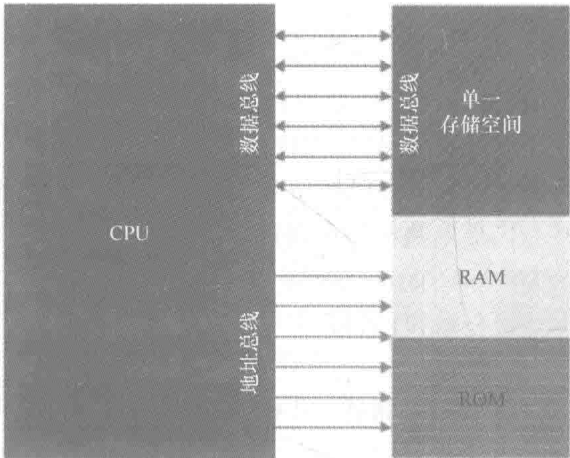
• ROM 是非易失性的数据存储器，意味着掉电后数据不会丢失。因此，它可以用来存储程序和永久数据，通常被称为程序存储器。目前有多种技术可以在 MCU 中实现 ROM 功能，包括 EEPROM 和闪存。

• EEPROM 可以用电擦除和重写，不需要经物理方法擦除。EEPROM 通过或非门实现快速获取和按位擦除，但其成本比其他的可擦除存储器（如闪存）要高。

哈佛结构（见图 3-6a）是一种将程序指令存储和数据存储分开的存储器结构。在这种模型中，程序存储器是只读的，而数据存储器可以读写。现代微处理器和微控制器采用改良的哈佛结构，允许数据和指令并行处理，指令和数据有不同的数据宽度（www. microchip. com/pic）。冯 · 诺依曼结构（又称普林斯顿结构）是一种将程序指令存储器和数据存储器合并在一起的存储器结构（见图 3-6b）。



a)



b)

图 3-6

a）哈佛结构框图　b）冯 · 诺依曼结构框图

3. 定时器和计数器

大多数微控制器都有一个或多个定时器，定时器可以通过计算固定的时间间隔来产生精确的延时，也可以用于触发某个事件。定时器还可以用于在规定的时间间隔内重复产生中断来初始化事件。

- 振荡器：微控制器使用石英晶振来产生精确稳定的时间脉冲。定时器通过对振荡器产生的时间脉冲计数来产生时间信号。

- 定时器：定时器是一个 8 位或 16 位的 SFR，每个输入脉冲后自动加 1。通过计数内部晶振产生的时间脉冲数来检测两个事件之间的时间的定时器被称作计时器，而通过外部时钟计数的定时器称为计数器。一个 8 位的定时器只能计数到 255；16 位的计数器可以达到 65535。定时器溢出后自动重置并重新开始计数。每次定时器溢出后都可以产生一个中断来通知用户。预分频器用于减少提供给定时器的脉冲数，效果是增加计数的时间间隔；后分频器用于调整中断出现的频率，不影响定时器本身。预分频器和后分频器都可以通过相关的 SFR 修改。

- 中断：中断是一种向 MCU 提出终止正常程序执行而转向其他程序的请求。中断服务程序（Interrupt Service Routine，ISR）是 MCU 收到中断请求后开始执行的一小段程序代码。ISR 完成后，MCU 返回收到中断请求前的位置继续工作。中断源有多种，包括硬件中断和软件中断。硬件中断一般由计数器溢出、串口接收到数据、或外部中断引脚变高电平时触发。在程序正常执行期间，处理器也可以根据程序需要自行进入中断。通过设置中断使能 SFR，可以使某些中断请求失效，但某些关键性的中断，如外部电平下降沿触发的中断，则无法进行失效设置。

- 监视时钟：监视时钟（Watch Dog Timer，WDT）是一种基于电阻 - 电容（Resistor - Capacitor，RC）振荡器的定时器，它独立于 MCU 中的其他定时器工作。WDT 的功能是保证不会陷入某种非正常状态（即程序跑飞）。WDT 开启后开始计数。如果 WDT 计数器溢出，微控制器将重置，并且程序从第一条指令开始重新执行。为了避免程序被 WDT 重置而影响其执行，应该在程序代码中每隔一段时间对 WDT 进行重置或清零。

4. 调试接口

基于微控制器的嵌入式系统不像计算机一样拥有键盘、监视器和磁盘驱动器等用户接口。因此，需要其他的方法来调试硬件和软件问题。可以通过电路发光二极管（Light - Emitting Diode，LED）指示程序运行到哪个节点，也可以使用逻辑分析仪来追踪系统总线上的数据。微控制器通常会提供硬件接口来调试其硬件和软件。此处我们将简单讲述硬件接口（Hector，2002），而调试方法和基于软件的调试将在后面的章节中介绍。

- 在线仿真器（In - Circuit Emulators，ICE）是一种嵌入式处理器的硬件调试装置。这些装置连接嵌入式系统和 PC，为软件开发者提供一个监控嵌入式系统的用户界面。这类装置可以对 MCU 提供完整控制，并跟踪系统总线上的数据。ICE

装置一般价格较高，但也只有硬件开发者使用。

• 在线调试器（In - Circuit Debuggers，ICD），也被称为背景模式仿真器（Background Mode Emulators，BME，常与 ICE 混淆）。ICD 与 ICE 有本质的区别，ICE 设备用仿真装置代替待测装置来实现调试，而 ICD 设备则通过 MCU 上的联合测试行为组织（Joint Test Action Group，JTAG）调试接口来调试实际的待测装置。ICD 调度调试能力取决于厂家为 MCU 或 MCU 系列提供的调试特征。典型的 ICD 允许开发者在目标 MCU 上逐步运行代码，启动或停止，同时读取寄存器和处理器的状态。它不提供像 ICE 设备一样的追踪功能。由于所有的处理器都内置了 ICD 硬件并支持 ICD，所以额外的成本只是 ICD 的通信硬件（用于连接 PC 和处理器/微控制器）。典型的 ICD 比 ICE 便宜 3 ~ 10 倍，并且更适合软件开发者。处理器厂家和仿真器厂家都在开发在 ICD 接口上实现类 ICE 功能的复合技术。

• ROM 监视器是最便宜的仿真方式。它们通过通用异步接收/发送器（Universal Asynchronous Receiver/Transmitter，UART）接口将调试信息提供给 PC 上的开发环境。ROM 监视器允许单行执行和设置断点，但不提供实时控制。UART 不适合用于嵌入式系统调试，因为 ROM 监视器需要 UART 来与 PC 通信。

3.4.2 常用微控制器

在选择 MCU 前需要进行详细的需求分析：需要多少 I/O 线和定时器？需要多少 RAM？是否需要串行通信？传感器接口是什么？操作速度如何？单个或多个设备的成本是多少？软件开发环境如何？只有这些问题都得到了回答，你才能选择制造商并确定满足需求的 CPU 设备系列。然后仔细学习该系列并确定最适合你需求的产品。从一个大系列中选取 MCU 的好处在于如果发现选择的 MCU 不合适，需要降级或升级，可以非常方便地更换设备。表 3-1 是三种常用微控制器系列的详细参数。

表 3-1　常用微控制器系列的关键特征

	PIC16C5X 系列	MSP430 系列	MegaAVR 系列
厂商	Microchip Technology	Texas Instruments	Atmel
处理器	8 位	16 位	8 位 AVR
指令集	RISC	RISC	RISC
存储器结构	改进的哈佛结构	冯·诺依曼结构	改进的哈佛结构
处理器速度	40MHz	16MHz	16 ~ 20MHz
闪存	多达 2KB EEPROM	高达 512KB	4 ~ 256KB
软件开发工具	PBASIC MPLAB PIC Start Plus	Code Composer Studio IAR Embedded Workbench MSPGCC TinyOS	AVR Studio Arduino IDE

3.5 接口和嵌入式通信

传感器系统的子系统之间，以及传感器系统与外部接口之间，有不同的通信方式。轻型协议的数字接口一般用于子系统间通信（如数字传感器与 MCU 之间的通信）。它们也被用于在传感器系统和较大系统之间提供双向输入/输出。嵌入式系统或引脚有限的芯片一般使用通用输入/输出（General Purpose Input/Output，GPIO）引脚。如它的名字所说，GPIO 引脚不具备特殊的功能，只是通过编程来实现输入传感器数据或输出对外控制指令，如 LED 指示器。模拟接口被用于在模拟传感器、信号调节电路和 MCU 的模拟接口直接传递信号。

为了标准化智能传感器聚合到更大系统中的过程，IEEE 制定了 1451 标准，这一标准提供了将传感器和变送器连接到微处理器、仪器系统和控制网络的接口标准。1451.4 标准定义了传感器电子数据表（Transducer Electronic Data Sheet，TEDS）的形式，TEDS 中含有不同制造商生成的不同传感器的关键信息。TEDS 主要存储在传感器的 EEPROM 中，包含序列号、校准日期、输出比例因子和基线漂移信息。TEDS 使得制造商可以更方便地使用现有的传感器和网络技术来开发可接入网络、系统和仪器的智能设备。虽然这一标准没有专门针对接口或定义物理连接件，但是大多数标准的有线连接（USB、以太网、无线连接 802.15.4、802.11 和 6LoWPAN）都适用（Lee，2005）。

3.5.1 嵌入式数字接口和协议

传感器的数字接口一般是串行接口，但是有些传感器需要非常高的数据吞吐量，比如数字图像传感器，这类传感器就需要并行接口。串行接口可以分为异步（RS－232、RS－485）和同步（I^2C、SPI）两种方式。许多现代 MCU 都聚合了 USART 接口，可以编程决定执行同步或异步通信协议（见图 3-7）。串行接口与并行接口相比有明显优势。最显著的一点是线路更为简单。此外，由于串行接口电缆内部的导体间相互作用（即串扰）小于并行接口电缆，所以串行接口电缆可以比并行接口电缆更长（Rouse，2011）。下面简单介绍一些传感器和传感器系统中常见的数字接口和协议。

1. 串行外设接口

SPI（Serial Peripheral Interface，串行外设接口）总线是一种全双工（数据可同时进行收发）的同步串行数据通信协议模式。SPI 总线最初由摩托罗拉公司研制开发，并被业界广泛接受。SPI 可被用于外围设备（如数字传感器）之间的串行通信，也可被用于微控制器和子系统（如无线通信模块）之间的通信。很多通用的 MCU（如 MSP430，www.ti.com/msp430）支持 SPI 接口。然而，SPI 标准的某些宽松的定义导致制造商在执行时有一些差异。因此，一些带有 SPI 接口的传感器可能

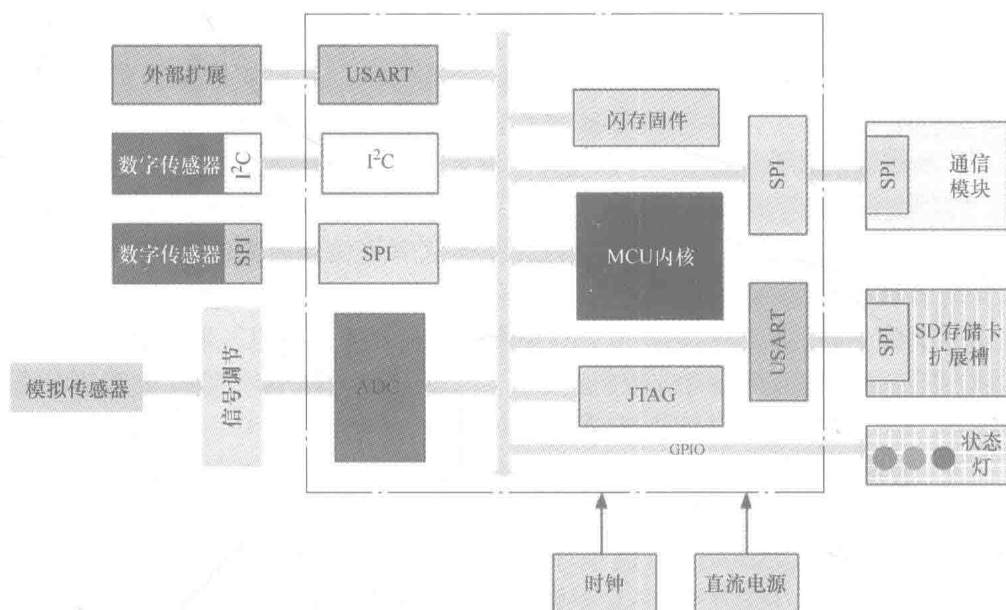


图 3-7 智能传感器的一般接口

需要对固件进行微调才能保证与 MCU 正常通信。

SPI 总线通常采用四线进行串行通信，包括一个用于发起和控制通信的主设备（对于传感器系统来说一般为 MCU），以及一个或者多个与主设备通信的从设备。SPI 总线一般在同一 PCB 上使用。在理论上，同一 PCB 上的子系统间的数据传输速率可达 100Mbit/s。然而，由于电抗（电子元件由于本身的电感或电容而阻止电流或电压改变的特性）随线长而增加，总线有一定的有效使用距离。美国国家半导体公司开发了一种名为 Microwire 的替换接口，其基于三线进行同步通信，同样具有主从结构、串行输入/输出以及独立时钟配置。Microwire 的数据传输速率可达 625kbit/s，在短距离通信时的限制与 SPI 保持一致（EE Herald，2006）。

SPI 适用于设备之间需要进行数据流通信的应用场景。由于其全双工的通信能力和高达几 Mbit/s 的数据传输速度，SPI 总线在只有单主设备、单从设备的应用场景中尤其简单高效。

2. I^2C 总线

I^2C 总线由飞利浦公司于 20 世纪 80 年代提出，用于同一 PCB 上的组件之间进行低速串行通信。I^2C 总线工作在近距离、多主机的模式下，作为一种低速外围设备与智能传感器（或主板）的连接接口被广泛接受，如图 3-8 所示。I^2C 总线采用两线进行双向通信，一条线用于传递时钟信号，另一条用于传递数据信号。在标准模式下，通信速度可以达到 100kbit/s，在高级或快速模式下，通信速度可以达到 400kbit/s，在极速模式下，通信速度可以达到 3.4Mbit/s。

I^2C 总线之所以对于很多应用（包括传感器接口）具有吸引力，关键是其简单和灵活的特性。在 I^2C 总线中，所有组件之间都是简单的主从关系。与大多数系统

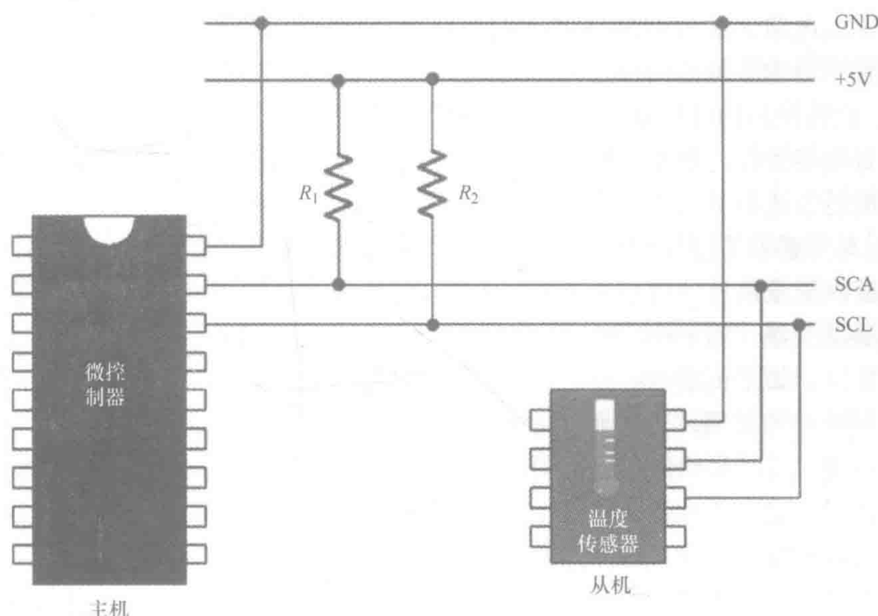


图 3-8　使用 I^2C 总线的微控制器与温度传感器的接口

不同，I^2C 协议支持多主设备，同时也可以有一个或者多个从设备。主设备和从设备都可以收发数据，但是只有主设备可以发起通信——主设备可以发送命令给从设备，并且请求数据；从设备只能响应，不能发起与主设备的通信。从设备有 7 位地址，因此总线最多可以支持 128 个从设备。在对从设备进行寻址时发送 8 位数据，前 7 位用于定位从设备，第 8 位用于通知从设备是主设备向从设备发送信息，还是从设备向主设备发送信息。

3.5.2　模拟接口

模拟传感器输出（电压、电阻、电流）一般情况下会被转化成数字量，以便简化数据的处理、传输和存储。如果模拟传感器的输出电压与 ADC 的输入电压范围匹配，就可以直接将其连接到独立的 ADC 或 MCU 内置的 ADC 上。然而实际上，大部分传感器的输出信号都需要进行一定的调节（比如电压转换、滤波或者信号隔离），才能保证其处于模数转换的正确电压范围。

一般有三种电压转换方式：分压、放大和位移。当输出电压的范围超出 ADC 输入电压区间时，需要进行分压。使用电阻分压电路就可以很容易达到目的。当传感器（如加速度计）的输出电压很小时，就需要进行放大。只用基于运放的放大电路就可以放大输出电压，提高传感器的电压范围和敏感度。通过线性放大，输出信号与输入信号的比率一般被称为增益。在选择放大电路的增益时需要注意确保放大后的输出不会超出 ADC 的输入范围，否则会引起信号饱和。如果放大后的传感器输出电压低于 ADC 的最小输入电压，传感器的输出电压就需要进行位移。基于

运放的加法电路通常用于进行电压位移。模拟信号调节的典型应用是使用惠斯顿电桥完成传感器的阻抗型测量量（如应变片）到电压量的转换（见第2章，机械传感器）。而转换后的电压量可以进行进一步的放大，以提高传感器的敏感度。

通过电容元件，放大器的频率响应可以被稳定在较低的频率中。然而，要提前对信号的特性进行充分的了解，以保证使用的传感器有合适的响应时间（Bates，2006）。对传感器的信号进行滤波会限制信号的频率范围，去除信号噪声，以便更准确地获取测量信息。信号被过滤的频率范围由滤波器的类型决定——低通、高通或者带通滤波器。如果传感器本身的信号频率低，就可以用低通滤波器来过滤高频信号。相反，如果传感器本身的信号频率高，那么低频信号就可以被过滤。对于交流电工频噪声的处理，通常使用陷波滤波器过滤50~60Hz范围的信号。需要谨记，选择滤波器时要确保没有有用的信息被过滤。比如，如果使用低通滤波器对基频信号进行过滤，那么就可能也过滤掉了基频信号的高频谐波中有价值的信息。因此，在设计滤波器之前，对传感器信号特性进行充分理解尤为重要。

在医疗保健应用中，由于传感器与病人身体可能有直接接触，对信号源、测量量以及转换电路之间进行信号隔离是重要的安全考虑。需要使用独立的放大器，以保证测量中没有直接的电气连接。这就避免了危险电压和电流通过传感器对病人造成潜在伤害的可能性。在相反的情况下，这也可以避免环境中的极端信号对测量电路造成伤害（Kester，2005）。

3.6 传感器通信

传感器将其测量结果传递给人或其他设备的能力是其最基本的功能。传感器通信有三种主要方法：直接呈现、有线通信以及无线通信。

传感器可以通过发光二极管（Light - Emitting Diode，LED）传递二进制状态信息，如电源的开关。单一使用的离散传感器（比如怀孕测试套件）可以通过变色指示器或者简单便宜的液晶显示屏（Liquid - Crystal Display，LCD）传递信息。随着传感器产生数据复杂度的增加，可能需要更大、更昂贵的LCD。LCD屏幕可以显示字符、符号和图表。根据尺寸、价格和配置的不同，显示的效果也千差万别。有些针对特定应用的LCD只能显示预定义的图表，而像气象站或者家用加热控制面板那样的LCD可以展示传感器输入的各种数据和符号。

简单的LCD及其下属传感器一般由简单的微控制器控制。当传感器输出的是图形数据时（比如智能手机游戏），就需要更复杂的显示设备以及能够进行复杂图形显示的图形处理单元。

3.6.1 标准有线接口

串口是一种通信接口，用于在数据终端设备（Data Terminal Equipment，DTE）

和数据电路终端设备（Data Circuit - Terminating Equipment，DCE）之间进行数据传输，同一时间只能传输一位。虽然以太网、相线以及USB都是顺序的传输数据，一般来说，串口通常指的是RS - 232标准。

为了成功完成数据通信，DTE和DCE必须统一通信标准，传输速率、每个字符的位数、是否有停止位和校验位，这些都要在标准中明确。速率也被称为波特率，指的是每秒钟传输的位数。波特率包括数据和成帧位，如果每次传输包括8位数据和两位成帧位，那么通信中只有80%是数据。奇偶校验位是数据传输中简单的检测错误的方式。奇偶校验位表示每帧数据位中逻辑1的个数是奇数还是偶数。如果接收到的帧的逻辑1的个数有变化，那就表示这一帧数据已经损坏。然而，这种简单的错误检测方法不能够识别偶数个位发生变化时的错误帧。停止位是在每个字符末尾发送、用于通知接收方传输结束的位。

最常见的通信配置是8 - N - 1，也就是8个数据位，没有校验位，1个停止位。显然，发送方和接收方必须使用同样的参数，否则接收方接收到的数据就会被错误的翻译，并作为无意义的字符显示到屏幕上，或者传递给处理器。这些参数可以通过UART集成电路的软件进行修改。一些其他的串行通信标准，如以太网、相线以及USB，能够自协商这些参数，这样用户就不需要手动进行配置。

DTE和DCE设备需要相互通知是否已经做好发送和接收的准备，这就需要进行流控制。RS - 232标准使用请求发送（Request to Send，RTS）和清除发送（Clear to Send，CTS）信号来通知数据发送和接收的就绪。这被称为硬件流控制。在进行软件流控制时，接收方通过发送特殊的字符（XON和XOFF）给发送方（也就是数据流相反的方向）来控制发送方何时可以发送数据。XON表示发送方可以发送数据，XOFF表明应停止发送数据。

1. RS - 232

RS - 232标准接口曾经是个人计算机与外设（调制解调器、鼠标、打印机）通信的标准接口之一。虽然这一功能现在已经被USB取代，但RS - 232仍然存在于医疗、零售以及军用设备中。RS - 232接口在发送端将UART的逻辑电平转化为更高的电压（ - 15 ~ - 3V为逻辑1， + 3 ~ + 15V为逻辑0），在接收端又将其转化为UART的逻辑电平。这种大幅度的电压能够提高电缆对电磁干扰的抵抗力，同时也能抵御一部分长电缆带来的电压损失。在使用标准电缆时，RS - 232的传输距离最多可以有50ft[⊖]，如果使用低电容电缆，传输距离可以达到1000ft。与之相对应的USB最大的传输距离只有16ft。然而，大幅度的电压虽然提高抗电磁干扰能力，但也增加了接口的功耗。RS - 232设备的9线和5线的接插件都比USB大，并且标准中并没有对其他设备供电的支持。由于RS - 232定义的电压比传感器板的逻辑电压高很多，不推荐将RS - 232设备不经过逻辑电压转换直接连接到传感器板。

⊖ 1ft = 0.3048m。——译者注

2. 虚拟串口

正像名字所说的那样，虚拟串口是通过软件来仿真标准串口。其可以提供物理串口的所有功能（波特率、数据位以及成帧位），并且可以使用串口的 API（应用程序接口）和库。蓝牙和 USB 设备经常由虚拟串口实现。在微控制器中，经常通过特定芯片，比如 FTDI（未来科技产品国际有限公司）的 FT232R - USB UART，来实现虚拟 COM 口。此芯片可以在硬件上处理所有的 USB 通信，并将通过异步串行通信与微控制器对接。FTDI 提供 Windows 和其他操作系统的驱动程序，用以驱动此芯片。虚拟串口还可以通过使用操作系统提供的 USB 通信设备类（Communication Devices Class，CDC）驱动在软件中实现。早期的 Arduino 板就是使用 USB CDC 驱动来实现这一功能的，比如 Arduino Uno 和 Mega 2560。最新的 Arduino 板则使用了 FTDI 芯片。

3. RS - 485

RS - 485 用于配置廉价的本地网络和多点通信链路。其可以在低速率下覆盖较大距离（4000ft，速度为 100kbit/s），或者在高速率下覆盖较小距离（50ft，速度为 35Mbit/s）。设备可以在共享的电路中以菊花链的方式组合，共享电缆的终端电阻可以提供对远程噪声的屏蔽。RS - 485 驱动芯片在接收端提供电压位移。由于 RS - 485 串行数据通过共享的路径传播，当两个设备同时试图发送时，数据就会丢失。因此，串口软件必须有机制来保证数据传输的正确性，包括重发和收到数据的确认机制。RS - 485 正逐步被控制器局域网（Controller Area Networks，CAN）替代，但仍在自动化工厂、仓库以及电视演播厅中广泛应用。

4. 通用串行总线（USB）

USB 标准被设计用于简化计算机与计算机外设的连接、通信和供电。现在，其已经高效地替代了串口、并口以及移动设备充电接口。USB 标准定义了线缆连接，以及相对应的通信协议。截至目前，USB 共发行了三个版本：USB 1.x（满速，最高 12Mbit/s）、USB 2.0（高速，最高 480Mbit/s）和 USB 3.0（极速，最高 5Gbit/s）。每个新的版本都提高了传输速度，增加了新的接口和新的功能。

添加 USB 集线器可以提高单个 USB 主设备可以连接的 USB 接口数目。每个 USB 主设备最多可以控制 127 个设备。每个物理的 USB 设备可以有许多子功能，比如一个网络摄像头就可以既有视频功能，又有音频功能。如果被分配到一个地址的设备有多个功能，那这种设备就称为复合设备。如果每个功能都被分配了一个独立的地址，那么这种设备就被称为混合设备。当 USB 设备初次连接到 USB 主设备上时，主设备会读取 USB 的传输速度和设备信息。如果主设备支持设备的功能，也就是功能在 USB 设备类中有定义，那么就加载 USB 设备的驱动。USB 主设备为 USB 设备提供 5V 电压和最多 500mA 电流。需要更大电流的高功率设备可以通过 Y 形电缆连接两个 USB 口（其中一个负责供电和数据传输，另外一个只负责供电），或者使用额外的供电支持。USB 通常用于 PC 与传感器之间的通信接口，也用于数

据获取后的聚合、编程以及为设备供电等应用场景。

3.6.2 中短距离无线通信标准

在过去 15 年里，无线通信是重点的研究领域。使用无线通信有一系列显著的优点：减少设备要求（没有线缆），减少使用开销，能够随时增加新设备以及协议的灵活性。最基本的研究重点在物理层、介质访问控制（Media Access Control，MAC）层和网络层，以提高通信的效率、可靠性和鲁棒性。这就导致了对物理层低功耗无线领域的研究，比如 802.15.4、超宽带（Ultra - Wideband，UWB）技术，以及吸收跳频扩频（Frequency - Hopping Spread Spectrum，FHSS）技术以提高传输过程中对干扰的抵抗力。在 MAC 层，研究的重点在于高效的协议（比如各种时分复用（Time Division Multiple Access，TDMA）和低功耗占空比技术）。最后，在网络层，研究的重点在于网络结构，比如使用多级路由技术来支持传感器在地理上分散的区域使用。

在传感器应用领域主要有四个关键的低功耗无线通信标准，它们分别是蓝牙（IEEE 802.15.1）（Eliasson et al.，2008）、UWB（IEEE 802.15.3）、ZigBee（IEEE 802.15.4）和 Wi - Fi（IEEE 802.11）。每个标准都有不同的带宽和使用范围（Lee et al.，2007），如图 3-9 所示。蓝牙在可穿戴设备中应用广泛；ZigBee 或者说 802.15.4 在室内和室外多节点网络中应用；UWB 支持各种应用场景，包括可

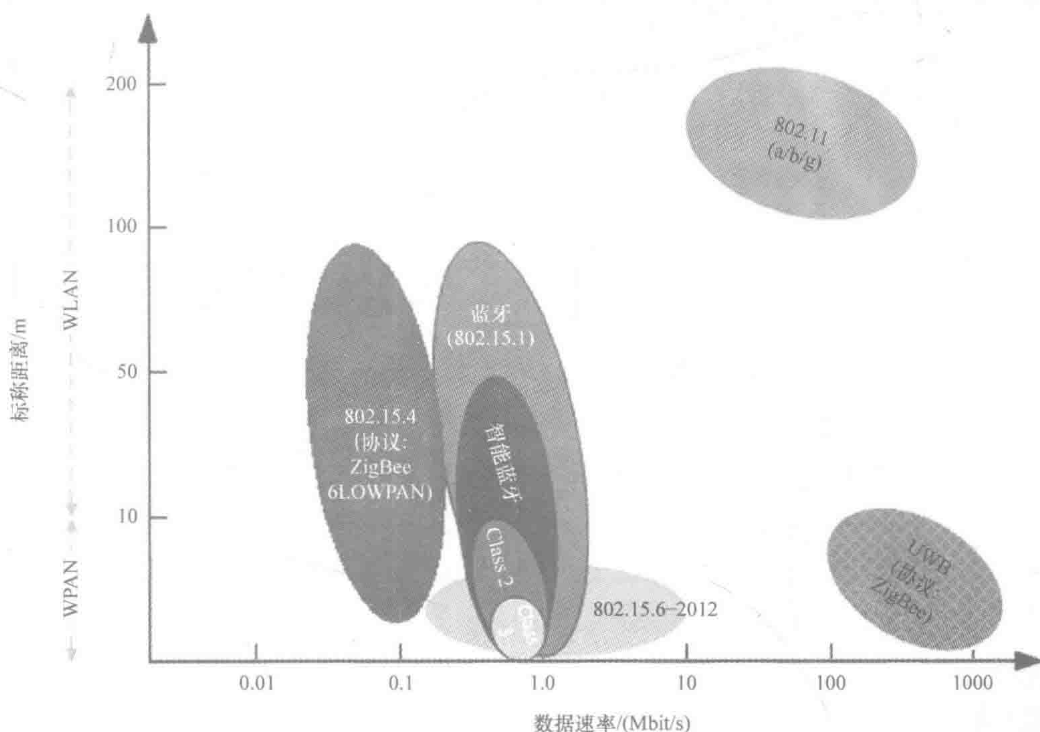


图 3-9 用于无线传感器的常见协议

植入传感器（Yuan et al., 2011）以及高精度地理信息定位（Win et al., 2009）。Wi－Fi经常被应用到需要大范围、高速率并且信号传递环境差的应用场景中。在对上述协议进行选择时，可以参考表3-2，里面列明了各个协议的优点和缺点。

表3-2 常见无线传输协议的优缺点

标准/协议	优点	缺点
蓝牙	低功耗 < 15mA（智能蓝牙） 数据通量高达24Mbit/s（第3版） 高抗干扰接口、多跳协议 低成本 技术成熟、安装基础好 灵活的数据包大小 支持智能手机和平板电脑 不需要设备之间有明确的连接线 智能蓝牙（4.0）理论上可以无限扩展从设备的数量	经典的蓝牙（BR/EDR）节点数量有限（7个从设备，1个主设备） 不适用与高速数据交换的应用场景 设备搜寻速度慢、能耗大 设备连接需要高的能量消耗 在蓝牙堆栈（Bluetooth stack）中很难完成精细的时间同步
802.15.4/ZigBee	高效的电源管理 协议简单 支持大量节点的网状网络 商业支持优势明显、安装基础强大 数据安全，支持身份验证、数据加密和完整性服务（802.15.4）	缺少多跳协议而导致的通信干扰问题 高堵塞环境下操作困难 有限的数据吞吐量（250kbit/s） 数据包小 本地智能手机不支持
UWB	抗噪声干扰 低能耗 抗多径衰减 信号可以穿过多种材料 潜在的高速数据传输	高成本 低普及率 信号采集时间长 FCC发射限制——在7.5GHz带宽上最大功率必须低于0.5mW 与其他无线电信号同时存在时相互干扰
802.11	在高阻塞环境中的高覆盖率 高速数据传输 支持平板电脑和智能手机 可扩展、适应性强 安全性好	电源要求高 没有收到信息时的常规侦听消耗大 单跳网络 相比蓝牙和802.15.4成本高

对无线设备的需求与我们的生活息息相关，并且随着智能手机使用率的提高，无线设备正不断促进无线电及其协议功能和性能上的创新。这其中的一个关键技术是智能蓝牙技术，其可以满足运动和医疗保健领域对连接和互操作方面的需求（见第10章）。智能蓝牙设备显著降低了功耗，在特定的使用条件下，只需要标准

的锂电池就可以保证工作数年之久。此协议已经在很多智能手机中使用，比如 iPhone 4S/5，以及摩托罗拉 Droid Razr（www.bluetooth.com/pages/Bluetooth - Smart - Devices）。蓝牙技术已经在智能手机和平板电脑中普及，因此大部分生产商可以简单地升级硬件来支持智能蓝牙。

智能手机让用户可以访问成千上万的应用，并借此获取、处理和可视化传感器数据。智能蓝牙低功耗的特点和对智能手机的支持让其已经在很多设备中得到了应用，比如 Nike Fuelband、Fitbit 以及 Motorola MOTACTV（Bennett，2012）。由于智能蓝牙技术标准的定义某种程度上说仍然在初期，很多互操作问题依然亟待解决。作为过渡方案，很多生产商提供对智能蓝牙和专用 ANT + 两种协议的支持，其中 ANT + 现在也广泛应用在医疗保健设备的市场中（Marker，2012）。

另一个名为 6LoWPAN 的协议说明了 IEEE 802.15.4 的 IP 网络能力。像传感器这样的低功率设备应该通过低速率或者低占空比的方式介入以太网，而 6LoWPAN 正是受这个概念的启发研制成功的。此标准在简化的 IPv6 层和 IEEE 802.15.4 MAC 层之间加入了一个适应层，可以自适应包大小，提供地址解析，并支持网状拓扑以及设备和服务的发现（Higuera et al.，2011）。协议最初应用于智能电表领域，现在逐渐拓展到其他（如医疗保健等）领域（Jin Ho et al.，2010）。

2012 年，IEEE 发布了 802.15.6 - 2012 协议，用于接近人体条件下的短程无线通信，速率可达 10Mbit/s。此协议被设计用于解决在人体上的传感器通信问题。遵从此协议的设备可以用很小的功率来减少人体对信号的吸收，并提高电池寿命。标准支持服务质量（Quality of Service，QoS），考虑到目的应用场景，同时具有很强的安全性。标准的目的应用场景包括 EEG、EKG/ECG，以及生命体征监测，比如对体温、心率、氧气以及血压监测。除了医疗领域之外，802.15.6 - 2012 也可能应用到类似于可穿戴游戏控制器等领域中（WPAN - Working - Group，2012）（Wang et al.，2012）。

另一个近期的无线标准是 ISO/IEC 1453 - 3 - 10。ISO/IEC 1453 - 3 - 10 基于由 EnOcean 开发的一种协议，并在能量采集方面进行了优化。基于此协议的传感器主要集中于监控和工业自动化应用领域（EnOcean，2012）。

3.6.3　专有无线协议

商用传感器中有很多专有的无线协议。这些协议既可以工作在工业、科学和医疗（Industrial，Scientific，and Medical，ISM）波段下，也可以工作在适当的无线频率下。它们经常重点对特定的应用进行优化，比如降低功耗以提高电池寿命（Smith，2012）。由于应用的关注点比较明确，这些协议往往是轻量级的，与通用的协议相比开销更小，性能的可预见性更强。到底专有解决方案提供的优化所带来的好处多，还是通用协议的灵活性和开放性更重要，这就需要应用开发者自己来把握。

ANT是一种私有的ISM波段无线传感器网络通信协议，由Dynastream Innovations公司（为GPS制造商Garmin的子公司）设计并向市场推出。其如今已经被并入很多公司的低功耗RF收发器中。这些公司包括北欧半导体公司、德州仪器公司（Texas Instruments，TI）等。ANT重点关注低频信号，被广泛应用于医疗健康领域，超过300家公司提供了基于此协议的产品。然而，ANT的关键局限在其缺少对智能手机和平板电脑的支持；只有HTC Rhyme和Sony Ericsson Xperia提供了原生的ANT支持。

Sensium是由Toumaz Technology公司开发的片上系统（System on a Chip，SoC），被用于低功耗可穿戴应用中，用以持续监视生命体征（比如心率、脉搏和呼吸），传输速率可达50kbit/s。数据通过868/915MHz频段的无线电传递到基站中进行存储。Sensium基于混合的信号模式，其中数字部分用于动态控制，而模拟处理的部分用于降低功耗。传感器设计可以在一个30mAh电池的支持下工作一年（Bindra，2008）（Toumaz，2013）。

FitLinxx公司的BodyLAN无线协议是另一个可穿戴应用领域的私有解决方案。报道称其已经被用于超过400万个活动、保健、健康和医疗设备中（FitLinxx，2013）。TI公司的SimpliciTI是运行在其RF Soc系列和MSP430 MCU上的低功率无线协议。此协议主要用于外部环境简单的应用场合，比如占有探测、一氧化碳感知、烟雾探测以及智能抄表领域（Texas Instruments，2008）。其他的解决方案还有Micrel公司的MicrelNet（Micrel，2012）以及Microchip Technology公司的MiWi/MiWi P2P。其中MiWi/MiWi P2P是基于IEEE 802.15.4针对无线个人局域网（WPAN）的实现（Microchip，2013）。

3.7 电源管理和能量采集

许多传感器，尤其是无线传感器，是以电池为电源的。当传感器需要在无人值守的情况下工作很长一段时间时，能量便成为了应用的最大限制。更换电池有时候可能代价很大，尤其是在传感器使用的地理位置比较分散，或者获取传感器有一定难度（比如传感器绑在路灯杆上）的情况下。因此，就需要在电池的使用效率以及对周围环境的能量采集方面进行更多的努力。电源管理使用一系列技术来最小化电力消耗，比如关闭传感器无线通信子系统，使用更加节能的协议，优化消息结构等。对电源管理技术的选择取决于应用的环境特性、性能要求（比如可靠性）以及协议需要。以下会简要介绍应用开发者需要知道的关于电源管理和能量收集的最重要部分。

3.7.1 电源管理

虽然深入分析电源控制算法和协议不在本节的介绍范围之内，在此也可以简要

了解一下电源管理的关键部分。通信——尤其是无线通信的物理层、数据链路层和网络层——消耗了传感器大部分能量（Lin et al.，2009）。有一个研究重点关注的是节能的 MAC 层协议。开销是持续的电源消耗。开销与管理网络功能相关，这些网络功能包括冲突管理，包控制，发送和重发的监听等。基于竞争的 MAC 层协议，比如 CSMA/CA（载波侦听多路访问/冲突避免），要求节点竞争传输介质的访问权限，因此更加没有效率。像 TDMA 这种基于计划的协议则提供了更加可预测的网络行为，因为每个节点都有一个传输时隙。这就让开销变小，电源需求变小，并让传感器可以在传输过程中周期地关闭。这个开关的过程同样会产生开销，因此需要在节省的能量与增加的开销之间做平衡。

很多基于 TDMA 的节能 MAC 层协议已经发布了，比如使用心跳的频率来完成 TDMA 的同步，以避免传输时间同步信号时产生的能量消耗。在无线线路环境比较极端或者存在间断干扰的情况下，数据传输的可靠性与包的大小有密切的关系。在此环境下，减少包的大小可以提高传输的可靠性。然而，如果包过小，又会导致过多的发送次数，也就造成了低效。

其他的电源管理技术还包括基于策略的方法，比如超时设定。这一般在固件中实现。当传感器闲置了预设的时间后，会自动进入低功耗睡眠状态。如果需要进行测量，或者收发数据，那传感器会被“唤醒”，之后又会进入睡眠状态。这种方法还可以通过增加一个倾斜或振动传感器监测运动来进行扩展，这就可以通过其唤醒其他维持在睡眠状态下的子系统。同样，声学和光学传感器（比如近红外传感器）也可以用来作为触发的机制。在传感器世界里，还有一种约会的通信方法。这种方法下传感器节点同步周期地唤醒和相互通信。与之相类似的还有异步唤醒，可以用来唤醒独立在基础调度之外的传感器节点。相邻节点传感器的唤醒时间要有效地相互重叠，以完成消息的交换。另外一种方式是拓扑控制，此时无线电的功率由已知的相邻节点在网络中的位置来决定。这种方式在静态网络中很有效率，因为节点间的距离不会改变（Zheng et al.，2006）。

3.7.2　能量采集

很多传感器的运行周期是以电源的情况作为基础的。传感器使用的电池类型有很多，有标准的碱性电池，也有锂/镍氢/锂聚合物电池。由于电池的容量有限，这就让能量采集或者能量搜寻技术有了用武之地。因为这些技术可以在运行时或者运行周期结束后为电池充电，并通过高效的电源管理来提高电池的寿命。

除此之外，能量采集技术甚至可以完全取代电池，让传感器永久地运行。由于采集节点产生与消耗的能量一样多，这种技术也被称为能量中性操作（Kansal et al.，2006）。将能量采集技术应用到无线传感器上很有挑战性，因为无线传感器工作时需要 1～100mW 能量（取决于配置情况和传感器类型）。当前的能量采集技术不足以持续地支持这个级别的能量。

为了解决这个问题，无线传感器经常使用间歇的工作模式，传感器在测量周期之间进入深度睡眠或者待机模式。通过类似于太阳能的能量采集机制来为大容量的能量存储设备充电，以便测量周期的高能量消耗（Boisseau et al.，2012）。很多方法都被应用于能量采集。各种方法的优缺点见表3-3（Gilbert et al.，2008）（Chalasani et al.，2008）。据IDTechEx估计，随着医疗保健行业的持续增长，到2021年，能量采集设备的市场将超过40亿美元（Harrop et al.，2011）。

表3-3 传感器的常规能量采集机制

能源	转换机制	优点	缺点
太阳能	光生原电池	效率达15mW/cm^3 简单 成本低	能源不可预计 不能直接给传感器提供能量 需要过电压保护
机械	机械振动 静电 电磁 压电 风能 流场 应力 人体 呼吸 血压 运动：如走动	能量输出可预测 潜在的高能量输出 可靠 多数设备环保性强	可穿戴部分使用寿命有限 某些压电材料长时间使用会引起性能退化 尺寸较大，尤其是电磁装置 人体 生物相容性 有限的能量输出 持续工作时间有限
热能（热电）	热交换 珀尔贴元件	没有活动件——使用寿命长 可能作为人体的可穿戴设备	低能量——电源输出取决于温度梯度 转化效率 高成本 低电源输出40μW/cm^3 对温度梯度要求高，因而应用范围有限
生物化学能	生物燃料电池氧化还原反应，如葡萄糖/O_2	可植入式人体应用 燃料来源稳定	生物元件的使用寿命和可靠性均有限 仅限于某些专门的应用领域 无法商业化 对环境敏感

能量源可以被分为可控能量源和不可控能量源。可控能量源（比如人体）能够根据需求提供能量；不可控能量源（比如风）只有在其存在时才能进行收集。能量源还可以根据来源的类型进行分类，比如可分为环境能源（风，太阳，热气

流），或者人体能源（人的行动）（Sudevalayam et al.，2011）。

3.8 微控制器的软件和调试

减少开发周期和降低开发成本是选择控制器的核心需求。如之前所说，传感器平台和样机开发工具可以加速硬件的开发。那么，直观的集成开发环境、熟悉的编程语言、示例代码以及开发手册则可以加速软件的开发。通过使用免费的IDE可以降低开发成本，比如使用Arduino IDE、MPLAB IDE（用于PIC微控制器）以及Eclipse（在Android设备开发时加入Android SDK）。在进行复杂应用开发时，使用商用IDE可以获得优化过的代码生成器以及调试工具，因此能够减少开发时间，进而降低总的开发成本，比如使用Keil μVision（www.keil.com/uvision/）。

对微控制器进行编程需要两个主机：目标主机（即需要被编程的微控制器）和上位主机（用于开发微控制器软件并将其发送到目标主机的个人计算机）。在开发的不同阶段需要不同类型的开发软件：编辑器，用于创建和编辑代码；编译器，用于将代码编译成机器语言；设备烧写程序，用于将机器代码下载到目标主机中；引导装载程序，用于目标设备加载机器代码。当然，用于控制微控制器的那些需要被编译的代码同样也是软件。

本节包括在软件开发过程中需要用到的各种类型的软件。同时还描述了用于测试嵌入式应用的各种硬件和软件调试手段。

3.8.1 IDE

IDE（见图3-10）是集成了创建、测试和使用微控制器固件所需要的各种工具的台式计算机应用程序。工具可能指的是以下的部分或者全部：编辑器，构建工具（编译器或者汇编器，连接器），以及调试工具（仿真器和模拟器）。

- 源码编辑器是专门设计用于编写代码的文本编辑器。虽然所有的文本编辑器都可以用来编写代码，但源码编辑器更适合程序员使用，因为其加入了一些代码编辑需要的功能，比如语法高亮、自动补全以及括号匹配。
- 编译器是对高级语言（如C语言）代码的语法进行审查和优化的计算机应用。如果代码符合语法规范，编译器就将其翻译成机器代码，并生成目标文件。微控制器IDE的编译器被更准确地称为“交叉编译器”，因为代码在一种类型的计算机上被编译，而在另外一种类型的主机上使用。
- 汇编器将低级汇编语言翻译成机器代码。
- 连接器将编译器生成的目标文件与由其他代码、甚至其他编译器生成的目标文件，以及实时操作系统（Real-Time Operating System，RTOS）模块和系统库文件连接到一起。连接的结果是可执行文件，称为hex文件。在微控制器IDE中，连接器经常是编译器的一部分，而不是独立的软件。

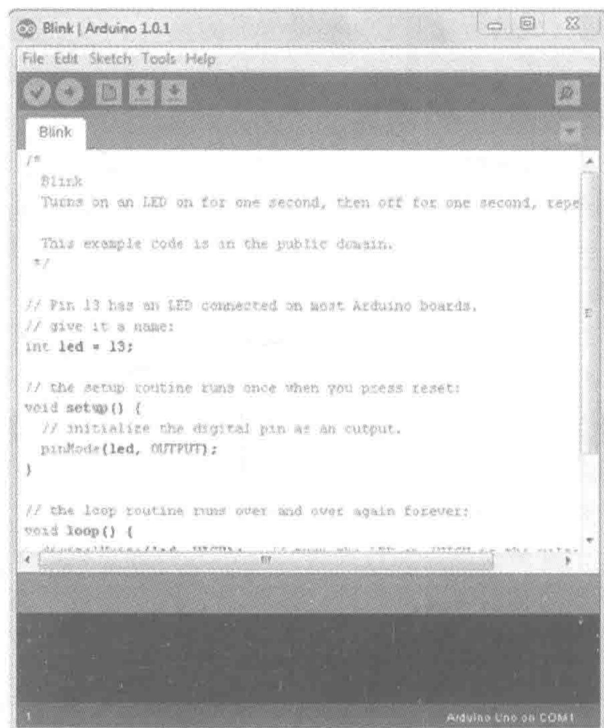


图 3-10 Arduino IDE

- 大部分新一代 MCU 都支持系统内编程（In - System Programming，ISP），这种技术让用户可以通过在主板和 PC 之间连接的适配器来对设备进行编程。设备编程软件一般集成在 IDE 中，但也可能是独立的软件。
- Bootloader 是运行在 MCU 的 ROM 中的一小段软件代码，它在 MCU 启动和重置时运行，是支持 MCU 的 ISP 功能的关键组件。

最常见的 IDE 是 Arduino IDE、用于 PIC 微控制器的 MPLAB（www.microchip.com/pic）以及 Keil μVision。它们都提供代码编辑器，集成的编译器和连接器，以及设备烧写程序。Keil IDE 还提供了调试和仿真工具，可以用于对很多生产商的 8051 和 ARM 系列设备进行编程。

3.8.2 开发语言

CPU 只能理解和执行由操作数和操作符构成的机器代码。机器代码难以直接理解，而且不同处理器的指令集往往差别很大。几乎所有的 MCU 程序都是用汇编语言或者 C 语言写的，相对于晦涩难懂的机器代码，这两种语言更接近自然语言。但是，他们也跟机器代码一样支持对系统功能的直接操作，如获取寄存器信息。Java 也可以用于嵌入式系统编程，但它与机器代码差别较大。

- 汇编语言是一种初级语言，每条指令都与单一的机器代码指令相对应。只

是操作符用英文单词代替，比如使用“jump”表示跳转到某处，而不使用一系列的数字表示。跟机器代码一样，汇编语言与处理器密切相关，执行效率很高；但编程困难且进度慢。

- C语言（或C语言的变体，如Arduino编程语言和nesC）是微控制器最常用的编程语言。它包含所有高级语言的特征，并且允许程序员在必要的时候插入汇编语言。现代的C语言编译器可以为MCU生成有效的机器代码，而不需要程序员理解这些代码。在多数情况下，从MCU中抽取的代码可以在其他相似的MCU上重编译。
- nesC语言（network embedded systems C）是一种C语言的变体，用于创建实时TinyOS系统的应用程序。它通过相互之间的接口将各个成分捆绑在一起创建应用程序。Shimmer和TelosB motes就是用这种语言编程。
- Java是一种面向对象的程序语言，因此它需要比8位或者16位MCU更强大的处理器。但是，Java的应用正在变得越来越广泛：它是Android应用程序最主要的开发语言，并且开发了Java runtime类用于基于ARM的MCU编程。

3.8.3 测试代码

由于不同计算机的外部设备不一样，所以调试嵌入式系统需要与调试PC端应用程序不一样的方法。嵌入式系统没有鼠标、键盘和监视器；但是，它们可以方便地插入LED、LCD或断开针脚来提供调试信息。ICE、背景调试模式（Background Febug Mode，BDM）和仿真器都是常用的方式，可以实现源码的单步调试。

- 单步调试：ICE和BDM比较早被提出来，ICE是用一个模拟目标功能的处理器从物理上来代替目标处理器进行调试；而BDM是使用目标处理器单步执行和测试代码。仿真器在软件中模拟目标微控制器的行为（某些仿真器还允许程序员模拟基本的外部事件）。但是，仿真器的速度不足以代替微控制器的实时行为，也不能精确地模拟外部成分的行为。仿真器不需要使用任何外部设备，是评估软件时最常用的方法，也是在调试硬件之前对软件进行初步评价的方法。
- 详细错误信息：RS-232接口可以将错误和调试信息从微控制器送入串口。串口的数据可以进入PC上的仿真终端并显示出来。如果设备存在LCD，那么详细错误信息也可以在LCD上显示。
- 针脚调试：给一个端口针脚置1或清零是确定代码中某点是否正常、并且控制事件间隔时间的一种简单粗暴的方法。同样的，LED也可以通过点亮或者熄灭来提高软件状态的虚拟指示。

3.9 小结

在本章中我们介绍了智能传感器、传感器系统和传感器平台的特征和区别。同

时也阐述了传感器接口、建立传感器系统、将传感器聚合到高级系统中或将数据显示给终端用户所需要的硬件和软件组成。微控制器是基于低成本传感器系统的结构中心，在本章中进行了详细讨论，并且讨论了用于数据传递的内部和外部通信协议。最后，我们回顾了控制智能传感器所需要的软件语言和开发环境，讨论了几种常用的调试方法。

参考文献

Huijsing, Johan H, "Smart Sensor Systems: Why? Where? How?," in *Smart Sensor Systems*, Meijer, Gerard C. M., Ed., New York, Wiley, 2008.

Mathas, Carolyn. "*Smart Sensors - Not Only Intelligent, but Adaptable*", Last Update: 2011, http://www.digikey.com/us/en/techzone/sensors/resources/articles/intelligent-adaptable-smart-sensors.html

PRWeb. "*Global Smart Sensors Market to Reach US$6.7 Billion by 2017, According to New Report by Global Industry Analysts, Inc.*", Last Update: 2012, http://www.prweb.com/releases/smart_sensors/flow_pressure_sensors/prweb9251955.htm

Córcoles, Emma P. and Martyn G. Boutelle, "Implantable Biosensors," in *Biosensors and Invasive Monitoring in Clinical Applications*, Springer International Publishing, 2013, pp. 21–41.

Meijer, Gerard, "Interface Electronics and Measurement Techniques for Smart Sensor Systems," in *Smart Sensor Systems*, Meijer, Gerard, Ed., Chichester, John Wiley & Sons, 2008, pp. 23–24.

Hunter, Gary W., Joseph R. Stetter, Peter J. Hesketh, and Chung-Chiun Liu, "Smart Sensor Systems", *Interface*, vol. 19 (4), 29–34, 2010.

Pecht, Michael G., *Prognostics and Health Management of Electronics*. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2008.

Burns, Adrian, *et al.*, "SHIMMER™ – A Wireless Sensor Platform for Noninvasive Biomedical Research," *IEEE Sensors*, vol. 10 (9), pp. 1527–1534, 2010.

Hector, Jonathan. "*How to choose an in-circuit emulator*", Last Update: 2002, http://eetimes.com/electronics-news/4134723/How-to-choose-an-in-circuit-emulator

Lee, Kang, "A Smart Transducer Interface Standard for Sensors and Actuators," in *The Industrial Information Technology Handbook*, Zurawski, R., Ed., Boca Raton, FL, CRC Press, 2005, pp. 1-16.

Rouse, Margaret. "*Serial Peripheral Interface (SPI)*", Last Update: March 2011, http://whatis.techtarget.com/definition/serial-peripheral-interface-SPI

EE Hearld, "SPI Bus interface", http://www.eeherald.com/section/design-guide/esmod12.html, 2006.

Bates, Martin, "Sensor Interfacing," in *Interfacing PIC Controllers*, Oxford, Newnes, 2006, pp. 236–238.

Kester, Walt, "Sensor Signal Conditioning," in *Sensor Technology Handbook*, Wilson, Jon S., Ed., Burlington, MA, Elsevier, 2005, pp. 87–89.

Eliasson, Jens, Per Lindgren, and Jerker Delsing, "A Bluetooth-based Sensor Node for Low-Power Ad Hoc Networks," *Journal of Computers*, vol. 3 (5), pp. 1–10, 2008.

Lee, Jin-Shyan, Yu-Wei Su, and Chung-Chou Shen, "A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi," presented at the 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Taipei, Taiwan, 2007.

Yuan, Gao, *et al.*, "Low-Power Ultrawideband Wireless Telemetry Transceiver for Medical Sensor Applications," *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 58 (3), pp. 768–772, 2011.

Win, Moe Z., Davide Dardari, Andreas F. Molisch, and Jinyun Zhange, "History and Applications of UWB," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97 (2), pp. 198–204, 2009.

Bennett, Brian. "*The Power of Bluetooth 4.0: It'll change your life*", Last Update: March 2nd 2012, http://news.cnet.com/8301-1035_3-57389687-94/the-power-of-bluetooth-4.0-itll-change-your-life/

Marker, Ray. "*The current state of Bluetooth Smart/Low Energy in Sports Technology (and why it matters to you)*", Last Update: July 31st 2012, http://www.dcrainmaker.com/2012/07/the-current-state-of-bluetooth-smartlow.html

Higuera, Jorge E. and Jose Polo, "IEEE 1451 Standard in 6LoWPAN Sensor Networks Using a Compact Physical-Layer Transducer Electronic Datasheet," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 60 (8), pp. 2751–2758, 2011.

Jin Ho, Kim, Haw Rim, and Hong Choong Seon, "Development of a Framework to Support Network-based Mobility of 6LoWPAN Sensor Device for Mobile Healthcare System," in *Consumer Electronics (ICCE), 2010 Digest of Technical Papers International Conference on*, 2010, pp. 359–360.

Wireless Personal Area Network WPAN Working Group, "802.15.6-2012 - IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 15.6: Wireless Body Area Networks", http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.15.6-2012.html, 2012.

Wang, Jianqing and Qiong Wang, "Introduction to Body Area Communications," in *Body Area Communications: Channel Modeling, Communication Systems, and EMC*, Singapore, Malaysia Wiley-IEEE Press, 2012.

EnOcean. "*EnOcean Wireless Standard - First ISO/IEC wireless standard optimized for solutions with ultra-low power consumption and energy harvesting*", Last Update: 2012, http://www.enocean.com/en/enocean-wireless-standard/

Smith, Phil. "*Comparing Low-Power Wireless Technologies*", Last Update: 2012, http://www.digikey.com/us/en/techzone/wireless/resources/articles/comparing-low-power-wireless.html

Bindra, Ashok, "Medical Info-communications Signals an Era of Body Area Networking", *Microwaves and RF*, vol. 47, 10–14, 2008, http://rfdesign.com/next_generation_wireless/short_range_wireless/0208RFDFeature1.pdf

Toumaz. "*SensiumVitals*™", Last Update: 2013, http://www.toumaz.com/toumaz-healthcare#.UoNbQ_nQCSp

FitLinxx. "*BodyLAN Wireless Protocol*", Last Update: 2013, http://www.fitlinxx.net/bodylan-wireless-protocol.htm

Texas Instruments, "SimpliciTI™ - RF Made Easy", http://www.ti.com/corp/docs/landing/simpliciTI/index.htm?DCMP=hpa_rf_general&HQS=NotApplicable+OT+simpliciti, 2008.

Micrel. "*Introducing the RadioWire® MicrelNet*™", Last Update: 2012, http://qwikradio.com/page.do?page=product-info/Micrelnet/Micrelnet.shtml

Microchip. "*MiWi*™ *Protocol*", Last Update: 2013, http://www.microchip.com/pagehandler/en-us/technology/personalareanetworks/technology/home.html

Lin, Xiao-Hui, Yu-Kwong Kwok, and Hui Wang, "Energy-Efficient Resource Management Techniques in Wireless Sensor Networks," in *Guide to Wireless Sensor Networks*, Misra, Sudip, Subhas Chandra Misr, and Isaac Woungang, Eds., London, Springer-Verlag, 2009, pp. 439–468.

Chin, Craig A., Garth V. Crosby, Tirthankar Ghosh, and Renita Murimi, "Advances and Challenges of Wireless Body Area Networks for Healthcare Applications," in *Computing, Networking and Communications (ICNC), 2012 International Conference on*, 2012, pp. 99–103.

Zheng, Rong, Jennifer C. Hou, and Ning Li, "Power Management and Power Control in Wireless Networks," in *Ad Hoc and Sensor Networks*, Pang, Yi and Yang Xiao, Eds., New York, Nova Science, 2006, pp. 1-30.

Kansal, Aman, Jason Hsu, Mani Srivastava, and Vijay Raghunathan, "Harvesting Aware Power Management for Sensor Networks," in *43rd Annual Design Automation Confernce* San Francisco, California, 2006, pp. 651–656.

Boisseau, Sebastien and Ghislain Despesse. "*Energy Harvesting, Wireless Sensor Networks & Opportunities for Industrial Applications*", Last Update: 27th Febuary, 2012, http://www.eetimes.com/design/smart-energy-design/4237022/Energy-harvesting--wireless-sensor-networks---opportunities-for-industrial-applications?pageNumber=1

Gilbert, James M. and Farooq Balouchi, "Comparison of Energy Harvesting Systems for Wireless Sensor Networks," *International Journal of Automation and Computing*, vol. 5 (4), pp. 334–347, 2008.

Chalasani, Sravanthi and James M. Conrad, "A Survey of Energy Harvesting Sources for Embedded Systems," in *IEEE Southeastcon 2008*, pp. 442–447.

Harrop, Peter and Raghu Das, "Energy Harvesting and Storage for Electronic Devices 2011–2021", IDTechEx, Cambridge, UK, 2011.

Sudevalayam, Sujesha and Purusgottam Kulkarni, "Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 13 (3), pp. 443–461, 2011.

第4章 传感器网络拓扑理论及设计

物联网（Internet of Things，IOT）最基本的定义就是将生活中的各类设备，如烤面包机、健身器材等，相互连接并最终连接至互联网。为了确保物联网的连接，最基本的要求是将设备直接连入互联网，同时设备产生的数据信息需要在本地网络经过规划和处理才能传输到互联网上。一些传感器网络并没有连接至因特网，它的数据是以简单的方式聚合，只在某些本地设备上显示和使用，例如智能手机或者PC。传感器网络的拓扑结构主要是由整个系统的应用领域决定的。个人网络可能会将所有传感器的数据统一汇总到数据中心节点上（即星形拓扑），而一个家庭监控网络则可能采用一种可以自我修复的网状拓扑。以上这些传感器网络拓扑结构的区别、应用以及各自最适合的应用场合将会在本章进行介绍。

随着越来越多的设备连入互联网，设备产生的数据量也随之增加，同时也带来了更多的挑战：数据的数量，数据的传输速度，数据的多样性，以及数据的真实性。传感器的数据很容易产生，但是对于数据的传输、存储以及管理会带来更多的成本。然而，并不是所有的数据都是有用的。因此，传感器网络，更准确地讲是网络中的数据交汇中心，在数据集成交汇时起到关键的作用：鉴别出数据中哪些是需要呈现给用户或者远处另一网络，哪些是无用数据需要舍弃。传感器产生的数据能够越早地被处理，则整个系统的成本就越低。现在越来越多的低能耗低价格的数据交汇中心设备被研制出来，从而向该目标靠近。我们将在本章详细地介绍这些数据交汇的设备。

在一个传感器网络中管理数量众多且类别不同的传感器是一项极具挑战的任务，特别是传感器使用在远程位置时。基于云端的传感器网络管理工具正逐渐受到重视和广泛应用。这些工具能够提供实时的网络状态信息，同时拥有远程遥控更改传感器配置的能力，并具备基础的数据存储和可视化功能。许多普及的基于云端的服务能够快速地集成到传感器平台上，例如Arduino。因此这些云端服务成为了制造商和物联网爱好者的常见工具。在本章的最后我们将会介绍一些最为普及的传感器网络管理工具以及它们的传感器接口。

4.1 传感器网络构成要素

一个完整的传感器网络是由一组智能传感器构成的，这些传感器通过有线或无线的方式相互连接，或者统一连接到中央信息汇聚器。在网络术语中，网络中每个拥有通信模块的构成要素可以称为一个节点。产生数据的节点称为消息源节点，而

接收数据的节点则称为汇聚节点。汇聚节点也可以是传感器网络的一个传感器，抑或是网络的网关，或者是一个本地信息汇聚器。一个消息源节点能够汇报常规数据，产生警告以及维护数据。传感器网络则要执行两个关键任务：数据收集和数据发布。数据收集是用于形容从每个传感器节点获取并传输数据到汇聚节点这一过程的术语。消息源会周期性或者按照指令发送数据到汇聚节点，汇聚节点接收到数据后再进行处理。数据发布则是一种在传感器网络的路由查询和选择数据过程。数据发布的过程有两个步骤。首先，汇聚节点描述其感兴趣的数据并在网络上广播这些数据的特征。每个节点需要创建一个缓存空间以保存这些感兴趣的数据。第二步，各个拥有感兴趣信息的节点将缓存中的数据发送至汇聚节点。

传感器网络可能会包括为数众多的分布在同一区域内同种类型的传感器，并且它们会提供相同的数据（同质传感器网络）；或者包括许多不同类别的传感器并提供不同类型的数据信息（异质传感器网络）。同质传感器网络能够延伸一个传感器的感测区域。例如，一个由气象传感器组成的网络通常会将传感器遍布城市的各个区域，相比一个安置在固定位置的气象传感器，这些数量众多且功能相同的传感器会提供更多、更丰富的气象信息，并且该网络可以用于研究整个城市局部气候的变化情况。在这种情况下，同质网络在不同的区域内检测同一参数时，如果一个传感器产生了错误数据，可以通过与相邻传感器的数据相比较而进行排查，从而使网络产生一定的容错能力。随着预测监测技术的发展，为了减小不必要信息的传播，这种空间分布式的传感器网络能够减小错误信息的发布，从而使得网络本身运作更加高效、更加节能（Hongbo，2011）。同质网络的另一个应用是可以利用相同类型的传感器来检测系统的不同领域。例如一个用惯性传感器连接至四肢的个人网络，四肢通常会产生不同的数据。在这种情况下，传感器网络会采集并同步每个传感器发来的数据，并允许用户在一定时间内来检查四肢的动作并进行比较。

异质传感器网络通常将不同类型的传感器传输的数据集成到一起。这些不同类型的传感器通常是为了实现一个共同的目的。家庭警报系统是一个典型的异质传感器网络。该系统会配备磁性开关用于检测门窗的开关情况，同时也会配备被动红外传感器来检测屋内运动。此外，系统还会包括一个执行器，例如警报器，当家庭被入侵后会发出警报。虽然这些传感器的传感方式不同，但是每个设备的目的都是一样的，都是用于入侵检测。

无线传感器网络（Wireless Sensor Networks，WSN）是传感器网络的一个子集，它也包括一个汇聚节点，通常被称为基站，以及一些无线、电池供电的传感器节点。基站通常比网络中的其他节点拥有更加强大的数据处理和存储能力。基站通常是交流供电的，但也不完全如此。现在智能手机可以作为无线个人局域网络（Wireless Personal Area Network，WPAN）中的一个基站，尽管手机都是采用电池供电。作为基站，智能手机相比网络中的其他传感器节点，需要拥有更好的电池续航能力，并且需要定期进行充电。传感器网络的寿命取决于无线传感器网络节点的

通信组件传感和处理的能源消耗情况以及电池寿命。选择低功耗无线和有效的网络通信协议是延长无线传感器网络寿命的关键因素。

4.1.1 传感器节点

传感器节点是一个能够采集传感器信息，进行一定的信息处理，并与网络中其他节点进行通信的智能传感器。关于智能传感器我们在第 3 章已经详尽地介绍过了。传感器平台，例如 Arduino，允许用户连接传感器和通信模块。拥有无缝连接功能的无线硬件模块使得用户不仅可以改变自己的通信协议，同时可以改变网络拓扑结构。例如，用 XBee 868 模块替换 Wi - Fi 模块，用户可以用一个具有更宽的检测范围自愈网状网络替换星形网络。

4.1.2 信息汇聚器、基站及网关

传感器节点需要一个汇聚节点来对数据进行处理、存储，同时通过长距离高吞吐量的有线或无线形式向外传输至其他网络。各种各样的术语被用来描述无线传感器网络中的各种数据采集和转换节点。运算设备，例如 M2M 设备、PC 等，能够被配置成信息汇聚器、网关、网桥、基站或者协调器，这可能会导致这些术语含义产生混淆。网络结构的复杂性以及这些术语应用领域的不同也会影响这些术语的确切定义。为了澄清这些术语，我们提供了以下的定义：

路由器：在两个或更多计算机网络之间发送数据包。

网关：在不同的网络之间执行协议转换。一个网关能够在网络中的任一层工作，同时与路由等不同，网关可以使用多个通信协议。PC、服务器以及 M2M 设备均可以作为网关，虽然它们常被用作路由器。在传感器网络中，网关负责使用不同的协议将数据从传感器节点传输到另一个网络，并提供命令反馈至传感器节点。网关一般工作在 OSI 层中的层 4 ~ 7。

网桥：连接两个或更多的网络段的数据链路层（OSI 的层 2）来创建一个信息汇集网络。

信息汇聚器：汇聚节点。能够从传感器网络中的各个节点获取原始数据，并通过合并冗余或相关数据以减少数据量的大小。这减少了网络流量和系统能耗，从而降低了成本。

在无线传感器网络中，基站是一个比其他节点拥有更多计算能力、能耗和通信资源的节点。基站的作用是从无线传感器网络发送数据至服务器，因此通常在传感器节点和终端用户之间可以看作是一个网关。

在 ZigBee 网络中，协调器节点负责管理整个传感器网络。具体而言，协调器在网络层中选择工作频道，并启用网络，以及允许其他设备加入到网络中。协调器还可以提供消息路由、安全管理和其他服务。

1. 机器对机器设备

机器对机器（Machine - to - Machine，M2M）设备是一种能够交换信息并无需人工操作即可执行指令的网络设备。一个 M2M 设备包括传感器，一个回程通信链路，例如蜂窝数据网络或者 Wi - Fi，以及能自动处理数据并决策的应用软件。M2M 系统中传感器信号输入和决策树是明确定义的，并且该系统经常用于远程监控或自动化任务。一个常见的应用实例就是自动贩卖机，当某项货物即将售尽时，可以及时提醒供货商。最初 M2M 技术只用于科学、工程及制造业领域，现在该技术应用于众多终端，如拥有网络连接和开放数据接口的家庭设备。M2M 技术现在也被应用于加热设备、净水机、甚至是咖啡机中（www.nespresso.com/pro/aguila/#/aguila）。拥有 M2M 通信功能的设备通常均以“智能”设备销售给终端用户。

虽然现在存在许多标准，例如开始被广泛应用的 MQ 遥测传输通信（MQTT），但是目前并没有标准的 M2M 无线或通信协议。随着物联网的继续发展，M2M 变得更加普及，供应商必须在 M2M 通信上制定大家公认的通信标准。

近年来，M2M 设备的数量飞速增长。它们可以作为一个端到端的解决方案或者一个独立的能够被用户配置的设备进行销售。M2M 设备只是一个可以通过软件配置操作的硬件，而这些配置过程也只是 M2M 解决方案的一部分。端到端解决方案的软件组件将会在本章中的后续部分更为详细地讨论。

2. 专有 M2M 解决方案

专有解决方案，例如 Libelium Meshlium M2M 设备（www.libelium.com/products/meshlium），提供了制造商传感器和云端解决方案之间的明确连接方案。专有解决方案同时提供了一种快速简单地从预定义传感器到预定义云端传输数据的方法。专有解决方案中的软件通常是在预定的频段中使用预定义的通信协议来优化与制造商传感器的连接。在该系统中，通常传感器接口与其他制造商的设备不匹配。而专有解决方案最大的优势就是便于终端用户的使用，通常只需要利用 M2M 设备或云端设备的网络接口就可以对传感器网络完成配置。关于现有的传感器类型和通信协议的相关知识允许制造商为系统管理增加更加先进的功能，如远程编程，而无需其他复杂且数量众多的设备的支持。

3. 智能手机

智能手机由于其集成了众多传感器并拥有处理和通信功能，可以作为传感器平台，这些内容已在第 2 章进行过介绍。与此同时，智能手机也可作为 M2M 设备，因为它能从其他外界传感器或数据源收集数据，存储分析数据以及与云端设备交互。智能手机作为 M2M 设备最大的优势在于它能连接数量众多的传感器。智能手机的应用程序配件，例如智能手表或血压监控仪，能通过操作系统定义的通信协议，利用物理或无线方式与手机连接和交互。苹果 App Store 和谷歌 Play 提供了直接访问应用软件的程序库，该库可以直接与传感器进行交互。这些应用程序库是由传感器制造商或第三方编写，目的在于解释和处理专有传感器返回的数据。应用程

序也可将数据上传至私有云端存储，从而进行长期监测。虽然智能手机的处理和通信规范与传统 M2M 设备基本类似，但是它们之间在应用软件上却不同。传统的 M2M 设备通常是一个无主装置，它在极少甚至无用户使用的情况下也可以工作数年。它有一个单一目标：将众多的数据集中到一个数据库中用于分析和决策，同时当特定事件发生时触发相应的响应。虽然智能手机可以像 M2M 设备一样执行相同的数据采集、处理以及决策任务，但是它仍然是一部手机和娱乐设备。数据的处理、存储和每个 App 的显示功能与其他应用的功能之间是相互独立的。这种数据归类方式，虽然是出于安全角度考虑，但是效率低下，使得用户难以将不同 App 之间获得的数据进行关联。

4. 传统 M2M 平台

近年来低功耗 M2M 设备数量飞速增长。基于 ARM 的设备，如 Raspberry Pi（aspberrypi. org）和 BeagleBoard（beagleboard. org），已经被用户作为 M2M 设备而广泛使用，用于监控和执行任务。这些设备能利用板上 GPIO（General - Purpose Input/Output，通用输入/输出）接口与传感器连接，同时硬件系统已经做到了为传感器提供屏蔽的功能。设备上的 USB 接口可以用来添加无线电收发接口，与具备无线功能的传感器连接或通过 GPRS（General Packet Radio Service，通用分组无线业务）与无线互联网连接。如图 4-1 所示，英特尔 Galileo（ arduino. cc/en/ArduinoCertified/IntelGalileo）是一个 32 位微控制器，它拥有与 Arduino1. 0 相互兼容的软硬件配置。因此该设备兼容现有的数量众多的 Arduino 设备，并可以使用 Arduino IDE 对其进行编程。Galileo 主板拥有两个 USB 接口和一个全尺寸迷你 PCI Express 插槽，可用于增加 Wi - Fi、蓝牙、GSM 模块或者固态硬盘。无论是基于 ARM 还是基于英特尔的设备均采用嵌入式 Linux（eLinux）系统。eLinux，例如 Raspbian 或者 Yocto，正成为 M2M 操作系统的标准。它为那些对 Linux 系统熟悉的用户提供了一个熟悉的交互接口，并允许用户将现有的众多免费开放的源码，用于网络开发、多媒体编辑以及数据处理。

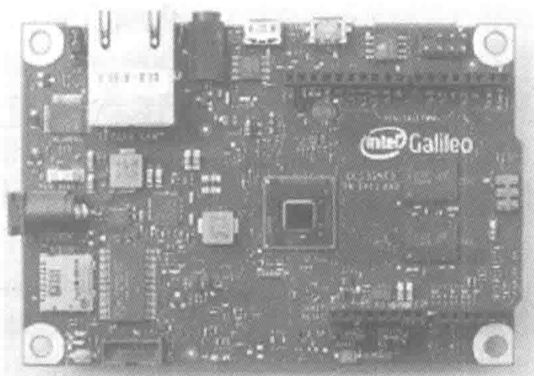


图 4-1 英特尔 Galileo 主板（照片由英特尔公司提供）

虽然平台即服务的提供商，如 Xively（xively. com）和 Device Cloud（etherios. com/products/devicecloud），提供了 API 来让云端存储平台与 RaspberryPi、BeagleBoard 以及英特尔 Galileo 等设备交互，但这些设备目前只被爱好者使用，并没有被用于任何集成设备的云端解决方案。Kontron M2M 智能开发套件含有一个基于英

特尔 Atom 的 M2M 设备、风河（Wind River）IDP 操作系统和 Cumulocity 云端设备。Kontron M2M 设备配置了一个集成了 Wi－Fi、802.15.4 以及 USB 接口来连接传感器和网络，实现与云端的数据交换，目前已经成为了一个商用解决方案。

4.2　传感器网络拓扑结构

在第 3 章我们回顾了传感器的结构、智能传感器以及传感器系统。它们通常拥有传感、处理、通信功能，并集成在一个单一电源供电的系统中。传感器能根据特定的应用而被独立使用，多个传感器通常会集成到更高级别的拓扑结构来实现现实生活中的各种应用。这些拓扑结构可以从复杂性上进行区分，简单的如从一个节点连接到信息汇聚器，复杂的包括在很大地理范围内的全网状网络分布。传感器网络拓扑结构也可被描述为一个具有平面或分层体系的结构。在一个平面（点对点）结构，网络中的每个节点（汇聚节点和传感器节点）都有相同的计算和通信能力。在分层体系结构中，节点工作的位置接近其各自的汇聚节点。因此，具有低能耗的节点只获取原始数据，并直接转发至对应的汇聚节点。通常汇聚节点相比其他普通的传感器节点，拥有更强的处理能力，更大的存储空间。最常见的网络拓扑结构如图 4-2 所示。传感器网络利用有线的形式连接，形成了常见的星形、线形以及总线拓扑结构。而无线传感器网络则经常使用星形、树形或者网状拓扑结构。

点对点拓扑：用于连接两个终端，如图 4-2a 所示。这个拓扑结构可以是永久的，亦可进行交换。永久的点对点拓扑结构是两个点之间利用有线连接的。而可替换连接指的是两个终端间的连接可发生变动。这个拓扑结构的常见应用将在第 9 ~ 11 章中介绍，那里将会介绍智能手机或平板电脑作为信息汇聚器时使用单一传感器的情况。

总线拓扑：是一种每个节点都连接到一个公用通信总线的结构，如图 4-2b 所示。信号在总线上可以沿两个方向传播，直到其到达目的地。总线网络必须包括防撞机制以解决当两个节点同时在总线上传输数据产生的问题。

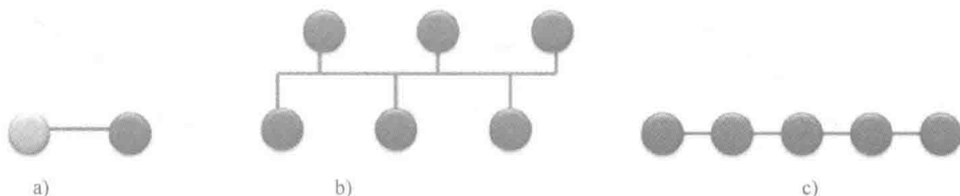


图 4-2　网络拓扑结构示例

a）点对点结构　b）总线结构　c）线形结构

线形拓扑：是一个节点与下一个节点相互连接的双向链路，如图 4-2c 所示。在网络的首尾端有两个终端节点，这两个节点均只有一个单独的连接，并连至相邻的节点，而其他的节点之间都两两相连。这个结构中，节点之间相互依赖，以便消

息传递到下一个节点。如果节点失效，任何连接到该断点的节点均将从网络中断开。

环形拓扑：是一种圆状的网络结构，如图 4-3a 所示。它和线形拓扑结构很类似，不过不同的是终端节点之间也相互连接。该结构中，所有的节点都是与其他两个相邻节点相互连接，数据则从数据源出发，沿着一个方向传播，直到到达目的地。该结构易于安装和重新配置。但是它在管理上价格昂贵，特别是单个节点失效后。许多网络会增加第二个环形通信网络，并从相反的方向传输数据以克服之前的问题。这种拓扑结构是小型办公室和学校经常采用的结构，不过现在使用较少。

星形拓扑：包括单个“中央节点”，例如集线器或者交换机，网络中的每个节点都与之相连，如图 4-3b 所示。该结构在设计、实现和拓展上都很简单。所有的数据都必须通过中央节点，因此，智能中央节点是必需的。当该节点损坏时，整个网络将不能正常工作。星形网络是最常见的传感器网络拓扑结构之一。其中常见的一个例子就是无线个人局域网（WPAN），它的中央节点是一个连接了许多无线传感器的智能手机。

树形拓扑：其节点是有层次结构的，其中最高级的是单个“根节点”，该节点连接了一个或多个低级别的节点，如图 4-3c 所示。一个树形拓扑包括了很多层次的节点。节点的信息处理和能耗随着数据从枝干流向树根而逐步增加，该结构允许数据在其产生的数据源处就进行一定的处理。这种拓扑结构的可拓展性和结构的简易性使得它容易识别和排除故障。但是当树形拓扑结构变得越来越复杂后，就变得越来越难以管理。

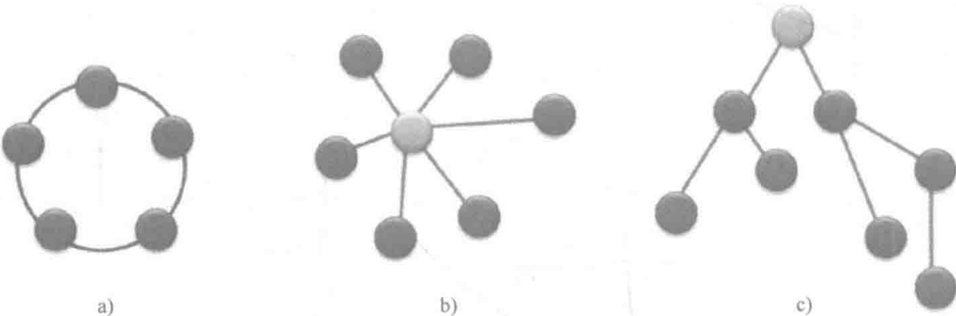
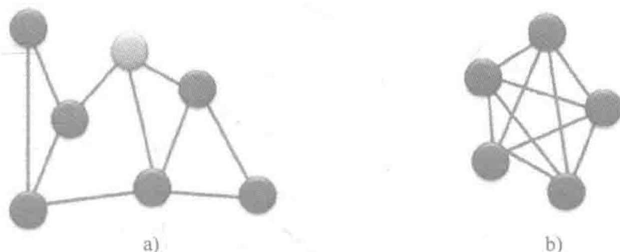


图 4-3　网络拓扑结构示例
a）环形结构　b）星形结构　c）树形结构

网状拓扑：节点传播自身的数据，同时也作为其他节点的后续，传播它们发来的数据。网状拓扑结构有两种主要形式：一种是部分连接网络，其中的一些节点连接了不止一个节点，如图 4-4a 所示；另一种是全连接网络，其中所有的节点都与其他节点一一相连，如图 4-4b 所示。网状网络是自愈型的，这是因为如果某个节点损坏后，数据传输可以从其他路径传播而不影响整个网络。全连接网络并不适合作为大型传感器网络的拓扑结构，这是因为该网络中需要连接的数量太多而变得难

于管理。部分连接网络提供了与全连接网络一样的自愈能力，但是不需要全连接网络那么大的连接开销。网状拓扑结构是目前无线网络中最常见的网络结构。



a)　　b)

图 4-4　网络拓扑结构示例

a）部分连接网状网络　b）全连接网状网络

传感器网络也可以依据逻辑结构，即网络用语传输数据的方法，进行分类。目前有两类逻辑拓扑结构：媒介共享和基于令牌。在媒介共享结构中，所有的节点均可访问它们想访问的媒介。这会导致冲突，这必须通过防冲突协议进行管理。这个逻辑结构可用于总线型、星形以及复合网络，这是由于这些结构拥有公用的数据总线或节点。而在基于令牌的逻辑协议中，令牌是在整个网络中传递的。如果一个节点希望发送数据，它必须先获得令牌。然后当数据到达目的地后，令牌再被释放并继续在网络中传递。基于令牌的方法在环形拓扑结构中最为适用。

4.3　传感器网络的应用

在应用领域，传感器网络通常是由它们应用的类型所定义描述，而不是它们的拓扑结构。例如，个人局域网络（PAN）传输个人数据，可以是星形或者点对点网络，该网络可以采用许多低功耗小范围的无线电来进行通信。本节将阐述健康、卫生和环境监测领域中最为常见的传感器网络的应用。

4.3.1　个人局域网络

个人局域网络连接了许多计算设备，例如笔记本电脑、平板电脑或者智能手机。这些设备可以通过有线（USB/串行电缆）或者无线（红外、蓝牙、蓝牙 LE）接口相互连接。个人局域网内设备间的数据交换通常是个人性质的（照片、文件等）。因此，一些基本的安全措施是必备的，以阻止未授权而使用网络的行为。无线个人局域网（WPAN）最初是作为个人电子设备的电缆替代技术。WPAN 可根据它们的数据吞吐量和功耗分为三大类（Misic et al.，2008）：

高速率数据 WPAN：基于 IEEE 802.15.3（用于在 WPAN 内规范多媒体数据流的 IEEE 标准）的实时多媒体应用。该标准支持多达 245 个无线固定和便携式设备，速度可达 55Mbit/s，传输距离可达 100m。

中速率数据 WPAN：IEEE 802.15.1 蓝牙标准的目的是作为商用设备电缆的替代。蓝牙支持的数据传输速率可达 3Mbit/s。该标准已经被基于传感器的 WPAN 广泛采用。

低速率数据 WPAN：这类网络是基于蓝牙或 802.15.4。可支持的数据传输速率为 250kbit/s。

术语体域网（BAN）或无线体域网（WBAN）经常与 WPAN 交替使用。WBAN 是在 WPAN 技术基础上建立的，具体用于实现位于人身体上或身体附近的通信交流，如图 4-5 所示。WBAN 依据实际应用的需求，包括了多种类型的传感器。WBAN 通常集成了计步器、心率计和呼吸监测器等（详见第 9 章和第 10 章），并连接至智能手机或计算机设备。WBAN 相比有线 PAN 提供了更大的灵活性。这在诊断应用中特别有用，因为诊断时实时监控是必需的。WBAN 同时也十分支持诊断协议，该协议指出传感器在测试过程不能影响或只能在小范围内影响病人。智能服装在服装和纺织品上结合了传感器，这可以直接与人体皮肤表面接触，并提供人体皮肤的准确数据。此外，智能服装一般是无创的，对使用者影响很小，因此它可以拓展并应用于动态健康监护（Fabrice et al.，2005）。智能服装上传感器的使用将会在第 10 章进行详细介绍。

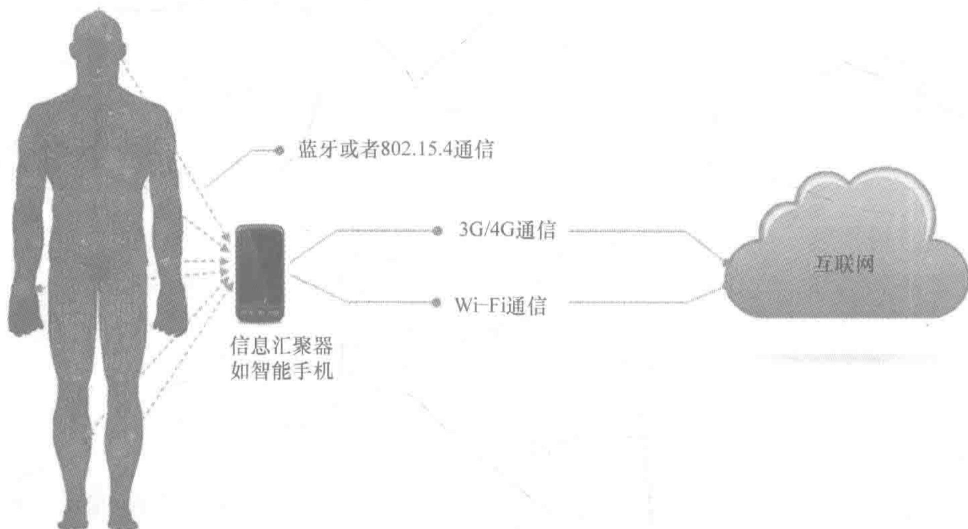


图 4-5　无线体域网

美国联邦通信委员会（FCC）已经批准了一个特定的频段用于实现医疗体域网络（MBAN）。在这个受保护的频段下（2360～2400MHz），设备在通信时受到外界如蓝牙、ZigBee 或 Wi－Fi 的干扰更小。

4.3.2　家庭传感器网络

在不久的将来，家庭将包含更多的智能设备，这些设备会以更智能、更人性化

的方式感知用户和熟悉环境。为了实现这一目标，每个家庭都必须包括一个大范围的网络来连接传感器和投影设备等。这需要一个智能后端，它不仅能应对实时事件，而且能预测将要发生的事件，并及时采取相应措施。一个简单的例子就是床头传感器，用于检测用户在午夜是否醒来，如果醒来后会在沿着前往洗手间的路上开启低亮度的灯光，来确保用户在黑暗中不会跌倒。

为了实现家庭传感器网络，目前除了数据干扰、数据挖掘、数据建模等方面，仍有众多的挑战。从传感器和网络的角度来看，通信协议是一个关键问题。家庭中的所有节点是否应该使用相同的 ZigBee 或者 Z 波通信协议呢？如果是的话，必须制定一个行业内认可的协议，这样用户就可以通过该协议使用大范围的各类传感器。另外，房屋是否应该能够适应不同的通信协议，并且允许可穿戴设备无缝连接到家庭网络并上传其数据？一个无处不在的家居系统的通信网络应该能够满足上述需求。首先，该系统应该操作便捷，因此能使终端的添加、替换或删除非常方便。传感器节点必须是自描述的，这些就基本不需要用户自己进行安装配置。

4.3.3　广域网

广域网（WAN）是一个覆盖了广阔地区（如任何电信网络覆盖的城市、地区或国界），并可使用私人或公共网络传输的网络。企业和政府利用广域网来传递不同区域的员工、客户、买家以及供货商的数据。本质上，这种通信模式允许企业有效的日常运作，而不受到地理位置的影响。因特网也可以视作是一个广域网，被企业、政府、组织或个人出于任何目的使用时，与广域网无异。广域网可以被认为是用于长距离传输数据的计算机网络技术，例如在不同的局域网（LAN）、城域网（MAN）或其他局部的计算机网络体系中传输数据。这种区别在于，常见的工作在层 1 或层 2 的 LAN（例如以太网或 Wi－Fi 形式）通常是面向物理局域网的，从而无法长距离传输数据。广域网不只是不同局域网之间的物理连接。一个校园网络（CAN）可能有一个本地化的骨干广域网技术，其连接了校园中不同的局域网。这可以促进更高带宽的应用或使得用户获得更好的体验。

广域网被用来连接局域网和其他类型的网络，以便一个位置的用户和计算机可以与其他地点的用户进行通信（见图 4-6）。许多广域网是为了某个特定的组织或个人建立的。而其他由因特网服务商建立的网络会提供组织的局域网连入互联网。广域网通常利用租用的线路。在租用线路的每一端，路由器会连接局域网内部的路由器。租用线路一般都非常昂贵。为了替代租用线路的使用，广域网还可以采用低成本的电路交换或分组交换的方法建立。网络协议，包括 TCP/IP，提供了传输和处理的功能。协议包括了 SONET/SDH、MPLS、ATM 和帧中断等协议，这些通常被广域网的服务提供商所使用。X. 25 是早期一个重要的广域网协议，并经常认为是帧中断协议的“鼻祖”。X. 25 中的一些协议和功能（改良升级过后）目前仍在帧中断协议中使用。

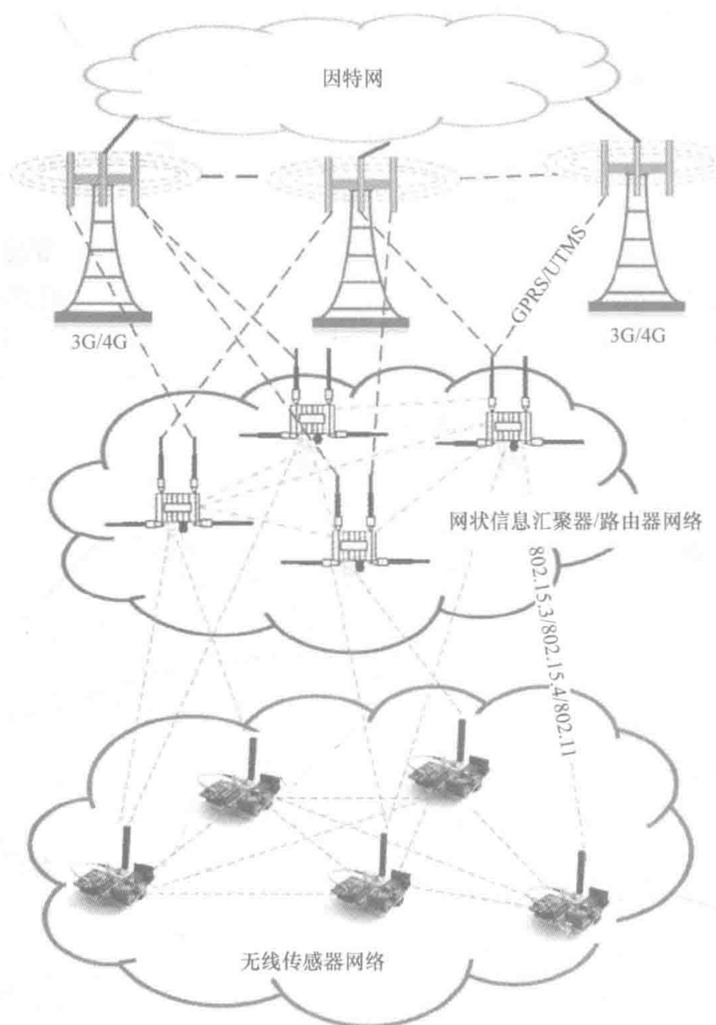


图 4-6 广域无线传感器网络示意图

4.4 传感器网络的特征和挑战

软件在传感器网络各个层面都普遍存在，并且软件的复杂度取决于传感器网络的层次以及设备上微处理器的能力。一种太阳能供电、无线、环境友好的传感器节点可以从传感器上获取数据，执行简单的处理，并按照预定义的通信协议传输至高性能的 M2M 设备上。M2M 设备可以从多个传感器节点上汇聚数据，存储数据，执行复杂的数据处理，并传输数据至其他 M2M 设备或云端服务器上以备后续的数据汇聚和处理。应用服务器在计算机应用、网页或者智能手机 App 上显示得到的数据。虽然传感器网络中每一层软件的复杂性和处理器的能力相差甚大，但每个设备中的软件基本都包括以下的特点（见图 4-7）：

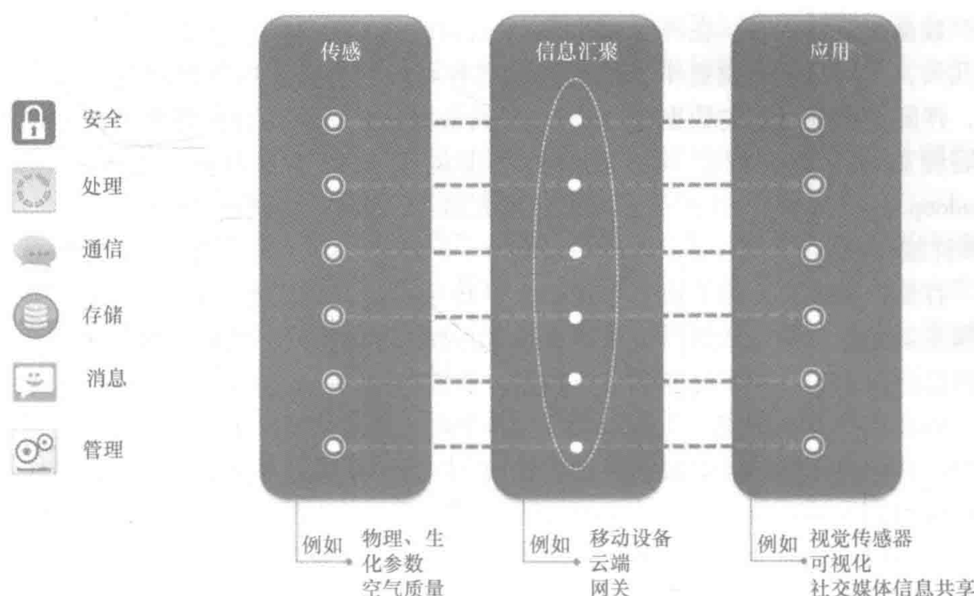


图4-7 传感器网络中软件组件的功能示意图

通信：在传感器网络的每层结构中，每个设备都有能力向其他设备传输数据。网络中最低阶的汇聚节点通常是无线传输和电池供电的。因此，必须工作在一个非常低功耗的无线协议。汇聚节点的软件必须在节点不发送数据时，及时关闭无线模块，以减少能耗。信息汇聚设备，如M2M设备或智能手机，通常则是交流供电或定期充电的。这些设备通常具备一个或多个无线模块来与传感器网络通信，并至少有一个回路来向因特网传递数据。该设备上的软件则必须能够实现并管理在多个频段进行数据传递。应用装置则是具备联网功能的设备，可与汇聚设备的API进行对接。应用软件和汇聚信息软件均可集成在一个单一的设备上，如智能手机。

消息：在两个设备间发送消息的传统方式就是达成一致的消息协议并根据该协议进行数据传递。如果不同的设备类型添加到网络，必须重新定义一个新的消息协议，同时网关也必须同时解析这两个协议。但是为每个新设备类型都创建一个新的协议也是不现实的。目前已开发了许多协议来解决这些不足。MQTT（mqtt. org）是一个轻量级的发布/订阅消息的传输协议，正成为物联网M2M连接标准和低功耗低带宽传感器网络的基础。所有的信息均通过一个MQTT消息代理，它能够将感兴趣的话题发布给客户端。订阅消息的能力可以节省信息处理成本和传输成本。

处理：数据传输和存储是传感器网络每一阶段成本最高的过程。因此在靠近传感器数据源处对数据处理和减少数据量是至关重要的。设备的处理能力是依赖于微处理器和设备的能耗限制。在无线网络中低功耗的边缘节点可能处理能力有限，但是也要执行最基本的数据处理，例如计算平均值以减少传输数据的总量。M2M设备是更强大的设备，能够从多个数据源分析数据，并推断趋势和事件发生，并决定

哪些数据可以被舍弃。在许多 M2M 设备监控应用中，系统的状态可以稳定几小时或几天，所以从这些设备中获取的数据很有可能被舍弃。如果检测到一个事件发生，伴随该事件产生的数据可以被 M2M 设备保存并提供给分析能力更高的设备进行后续处理。由云端服务器提供的数据处理和存储能力允许使用像 hadoop（hadoop. apache. org）这样的工具来处理大数据。大数据分析和数据可视化将在第 5 章详细介绍。

存储：数据在智能手机上存储依赖于传感器的应用类型。在 WBAN 上的一个不断发送原始数据的传感器节点需要最少的数据存储空间。然而，例如 3 导联的心电图监测以 256Hz 的采样速率采集数据，需要大量的存储空间以保存 48h 数据。智能传感器很少有存储或处理能力来维持一个嵌入式的数据库。因此，数据通常以文件的形式存储在传感器的数据存储器或 SD 卡上。M2M 设备拥有足够的存储空间和处理能力来维护一个嵌入式事务数据库，如 Sqlite（sqlite. org）。大多数 eLinux 分布包括 Sqlite 应用，或者至少能够通过单一命令下载软件。Sqlite 数据库可以访问本地控制台，或者使用 Python、C + + 或 Java 应用程序库。eLinux 操作系统及相关编程语言也包括调用 SQL 语言来对其他设备进行远程数据库的读写。在云端进行数据存储有许多软件选项，从 MySQL（mysql. com）到管理中小型数据库，到分布式数据库，如 Cassandra（cassandra. apache. org），或用于管理大数据的 MongoDB（mongodb. org）。数据库中的数据可以用于查询，或通过 API 从应用程序进行更新。

管理：设备管理是传感器网络最为关键的任务之一。传感器网络的管理者必须能够在他的网络内远程配置传感器、升级软件、运行诊断并对不响应的传感器产生预警。不能进行远程管理的传感器网络是一种非可拓展的传感器网络。一些基于云端的服务，如 Xively 和设备云，已经在近年涌现，提供了基于云端的设备管理功能。无论是可安装在 IP 可寻址传感器上并提供服务的数据库还是网关设备，必须有可以在基于云的管理控制台注册新设备的方法和允许传感器网络管理员查看状态和远程配置设备的管理台。这些服务还提供了基本数据存储、基础数据分析能力以及用于应用设备和服务器与网络进行数据交互的 API。

4.4.1 安全

安全是许多传感器应用中的关键要求。这在传感器收集和传递医疗数据时体现得尤为明显。在使用无线传感器时，是否会有人盗取或干扰数据的问题永远不会消失。对传感器安全的问题进行深入分析已经超过了本书的范畴，而且许多优秀的书籍已经对这一话题进行了深入的探讨。因此，我们这里主要着眼于传感器应用领域相关的关键问题。传感器有一定的安全挑战，这是由于它们都是资源受限设备：它们的计算能力、存储空间、电力资源以及通信速度和带宽都是有限制的。

传感器能通过个体识别来提供安全保障。这种形式的感知被称为生物传感。在生物安全的方法中，利用唯一的个体特征，例如心脏的电信号特征，可以用来识别

个体。这种形式的安全措施开始出现在电子设备上，例如笔记本电脑和智能手机上的指纹识别。在这种方式中，传感器可用于确保访问其他传感器数据时的安全性。

1. 关键安全目标

传感器网络中的安全目标是保护单个传感器节点和防止出现在网络内外部的恶意攻击。安全要求的关键在于帮助维护网络的完整性，具体要求如下：

数据保密性：这通常是优先级最高的目标，并致力于禁止未经授权的用户访问传感器，以防止窃听。这对于使用多个传感器的应用特别重要，例如 WBAN。攻击者可以根据数据流推断出关于个人的相关信息。最常见的保护数据的方式是使用密码加密数据。

数据完整性：重点是确保收到的数据没有被以任何方式改变，或者经过恶意篡改抑或传输过程中出现的偶然错误。完整性检查一般是通过哈希加密的方法，该方法类似于循环冗余校验（CRC）。通常的哈希值包括 MD5 和 SHA。

认证：认证使得传感器节点或信息汇聚器能确保这些节点是连接上的。各种机制均可用于认证，包括认证密钥或数字签名的交换。这些方法允许一方证明自己的身份，并防止伪造或伪装。

不可否认：不可否认确保了传感器节点不能否认之前发送的消息。数字签名结合公钥技术是实现不可否认的共同机制。

授权：授权确保了只有获得批准的节点才能够访问网络服务或特定的目的地。

时效性：时效性检测确保传感器数据信息是实时的、可靠的和不重复的。从安全角度来看，这可以防止利用旧消息重复攻击网络。时效性通常是通过检验传感器发送的数据包的序列号和时间戳来实现的。

2. 针对传感器网络的攻击

网络的恶意攻击是大多数传感器的关键安全问题。无线传感器网络容易受到攻击，如消息欺骗或消息回放。攻击类型可分为内部攻击和外部攻击。外部攻击可以是主动的，也可以是被动的（Hongbo，2011）。攻击也可以基于网络层不同而划分。

在被动攻击中，对于传感器信息的未授权窃听经常发生。这种形式的攻击可以用加密手段来防范。网络上主动攻击的目的是为了破坏正常的网络功能。使用拒绝服务（DOS）的攻击是常用的方法。这种类型的攻击包括信号干扰和重复查询传感器的电池（拒绝睡眠攻击）。许多这种性质的攻击可以用鲁棒的认证机制来预防。干扰一般是在使用扩频或跳频通信时产生的，如蓝牙。其他形式的外部攻击，包括篡改，会导致传感器节点物理捕获的困难。虽然很难预防对传感器节点的物理干扰，但是节点可以通过删除加密密钥和系统存储器的固件/软件来应对这些篡改（Chaos Computer Club，2013）。

当一个内部攻击发生时，攻击者对单个传感器节点进行挟持，并利用该节点破坏或阻碍网络上任何有用的功能。这种性质的普通攻击包括 Sybil、节点复制攻击、

洪泛攻击、选择性转发攻击以及 sinkhole 攻击/黑洞攻击（Serbanati et al.，2011）。

3. 安全措施

传感器网络的安全预防措施可分为两类：加密和入侵检测。各种强大的加密技术可用于无线传感器网络，例如 128 位基于 AES 的多密钥加密技术。但是这些解决方案都有着显著的计算开销，因此也带来了较多的能耗要求。此外，基础建设在管理、分布和认证上都可能需要这些加密技术。

入侵检测是检测网络中的异常反应。这些反应可能是由于虫洞或 Sybil 攻击导致的。入侵检测是指二线防御，因为它并不能防御攻击，只能识别攻击是否发生。入侵检测系统（IDS）一般都是基于规则或基于异常的。基于规则的 IDS 通过使用预定义的攻击方式来检测入侵。它可以非常精确地检测已知的攻击，但难以检测那些不明确的新型攻击。基于异常的 IDS 通过匹配流量模式或资源利用情况来检测入侵。异常检测方法在发现已知和未知攻击上都非常有用。但它也存在很高的假阳性率和假阴性率（Drahanský，2011）。

目前无线传感器网络中并没有真正的端到端的安全解决方案。实现一个强大的解决方案将面对无线传感器网络异构性的挑战，其中包括无线传感器网络中节点的资源能力不同、使用模型不同等问题。

随着智能手机和平板电脑的传感器集成度的持续增长，相关风险也越来越多。这些设备将均有可能携带敏感的需要保护的个人健康数据。对于与智能手机和平板电脑连接的离散无线传感器的应用而言，确保传感器和智能手机间连接的安全是至关重要的。例如，蓝牙实现了保密性、身份验证，以及基于 SAFER + 分组密码和自定义算法的密钥推导。集成了传感器的设备，一个安全的无线连接并不是很大的问题。但是数据存储在设备上，必须被保护，同时必须一直确保安全至服务结束。同时与云端服务器数据传输时也必须保证安全。例如 AuthenTec MatrixDAR，该产品就可以用于提供这些服务。然而，在未来我们可能会看到更多的安全措施，如建立一个安全区域，直接集成到硬件和操作系统中，来保护数据传输功能。这些功能将增强用户和网络环境平台的安全等级，以控制传感器数据访问和处理。这些功能也将在用户的数据不管是否受保护时及时通知他们。安全平台将自动管理其他应用和服务器发来的数据访问需求，无论是本地的还是云端的，都将取决于设备数据安全的保护策略。

4. 生物识别

传感器的安全应用集中表现在，从传感器到汇聚器或者从传感器到多跳无线传感器网络中的某个传感器的数据传输过程中，对传输数据安全的保障。传感器也可以用于确保生物识别检测系统的安全性。生物识别技术用于识别个体独一无二的物理的、生理的、行为的或生物的特征。作为表征生物识别技术安全性的鲁棒性是基于上述特征不可能或者至少很难被复制或者掩饰的假设。另一个生物识别技术安全性的优势是该识别过程不需要密码、身份证、安全密钥等。这使得它相比于传统的

保密途径更加方便并且有可能成本更低。有各种各样的方案已经出现，包括人脸识别、指纹识别、视网膜扫描以及 DNA 分析。我们将着重于介绍识别过程中使用传感器的方法。

指纹识别技术：是使用最广泛的生物识别方法之一，它通过检测一个手指的指纹来进行检定或验证。主要有两种指纹采集的方法：一种是使用触摸传感器检测用户指尖上指纹的峰谷；另一种方法是基于划擦传感器，用户将手指放在指定的起点连续的平滑的划擦传感器，传感器在一个预置频率中采集数据，然后将读到的数据合成一个图像。两种方法都有实用和易接受的优点。而且，划擦传感器很容易集成到笔记本电脑或智能手机等移动设备。指纹识别传感器一般是光学的或者固态的。光学传感器是基于指纹成像和使用算法来处理图像。固态传感器通过使用电容、热量、电导率、压力的检测技术来获取指纹。两种方法都是将获取的数据转化成一组独特的特征值来识别个体。指纹识别技术并非万无一失。许多技术已被证明可以使用现成的家庭用品来仿冒一个人的指纹，比如备受关注的 iPhone 5S 指纹黑客（Chaos Computer Club，2013）。指纹识别的安全性可以通过在检测过程中使用活性指标来提高，活性指标指的是检测过程中验证测量特征来自于一个活着的人。有很多技术可以检测生物的活性，包括汗、血氧、冷热刺激反应（Drahanský，2011）。

心电图（ECG）生物识别：是对用户使用心脏电脉冲。心脏的位置大小，胸部结构以及一些其他特征产生一个独特的 ECG 信号（Israel et al.，2005）。相比其他生物识别技术，基于 ECG 认证的技术的优点在于 ECG 信号可以从皮肤表层来提取，从而检测心脏的活动，这使得 ECG 容易获取。另一个重要的优势是它难以被仿造，它也可以作为生命活动指标。ECG 生物识别技术仍然处于起步阶段，各种研究问题，比如独特性、永久性、可扩展性在该技术应用于产品前有待解决。

脑电图（EEG）生物识别：EEG 提供了脑电活动的情况。它之所以可以用于生物识别，是因为人的大脑是由神经元和突触组成的，而每个人大脑都是不同的。EEG 信号通常分为 α（8～13Hz）、β（14～30Hz）和 θ（4～7Hz）节律。比如中心频率、最大功率、功率总和这些特征对应的节律都是可以被用于识别的（Lin et al.，2011）。然而，这种方法的局限性是产生系统的成本较大。尽管 EEG 检测的成本是可接受的，但是对于这个级别的设备能否获得 EEG 信号来足够准确地用于生物识别还是具有争议。同时，传感器目前用于日常使用显得太过显眼，而且对环境噪声较为敏感。

步态：基于行走方式的生物个体识别在文献中有报道（Derawi et al.，2010）。步态通常使用穿戴式的传感器或者集成到手持设备的传感器，比如被集成到智能手机上。在实践中，这种方法收到包括传感器在身体上位置的敏感性、脚受伤、疾病、中毒、怀孕、体重急剧增加或减少等各种问题的影响。另一种方法就是使用地板传感器，它的优势在于不显眼，可以准确地提供步态数据用于识别。然而，地板传感器只能在它们所安装的位置使用，而且这些传感器的成本也过高。

4.4.2 传感器网络面临的挑战

在实现和维护一个传感器网络的同时，有许多技术上和特定领域上的挑战。这些挑战包括用于监测环境的隐形安装传感器的供电，亦可包括用于保健和健康的穿戴式传感器的生物相容性。最主要的挑战有：

电源：传感器节点必须能够收集或生成足够的能量以满足它们的操作需求。一个传感器节点是不可扩展的，而且它也不能在其实质性寿命（简易的传感器寿命只有数小时；可充电的、可穿戴的传感器寿命有数天；与环境相关的传感器寿命可长达数年）过程中自给自足能量。应对传感器网络的功耗和供电的挑战前面已经提到。第一，电池技术不断改进，采用更小体积设计提供更长久的电池寿命。第二，数据通信的能耗在通过引进轻量级消息传输协议和低功耗射频模块得到改善。第三，处理器技术的发展产生了低功耗的处理器。最后，供电的发展，以及不同的形式，如太阳电池、燃料电池、热电池和生化电池，这些电池的出现意味着传感器节点的提供能量的方式越来越多样化和实用。

自主节点和网络：传感器节点和传感器网络的运行能力以最小的人工交互来实现，对发展真正可扩展的大型传感器网络至关重要。这是通过使用预置的策略和规则，使各个节点和网络能自主的管理和配置。

可靠性和安全性：数据的安全可靠传输是传感器网络最为关键的部分，特别是在健康领域。然而，这些在数据大小、系统功耗和可扩展性上会大大提高开销。但无论要多少费用，关键的健康诊断数据必须得到保护并且安全的传输。两者的平衡通过传输较少的关键数据得到实现。能否降低数据率？匿名的健康数据是否也需要与个人健康数据具有相同的保密等级？这些答案将建立在一个应用程序上，通过合适的软硬件方案来面对这些挑战。

耐久性：可穿戴式的和环境传感器受到许多环境因素的挑战。环境传感器安装在一个城市环境下会受雨、风、紫外线照射、污垢的影响，甚至破坏。可穿戴式传感器会受到有意无意的浸没，与衣物之间的摩擦，以及被其他对象擦伤。所以不管环境如何，这些传感器在这些环境下必须足够耐用且保证长时间的准确运行。

生物相容性：传感器长期与人体接触带来的影响尚不得而知。由于人们开始穿上传感器会持续几个月或几年时间，所以传感器材料的生物相容性变得越来越重要。例如，心电图电极必须在直接接触皮肤 7 ~ 10 天后更换来减少其对皮肤的刺激。此外，由于体内传感器的应用越来越流行，其生物相容性变得越来越重要。

隐私和数据所有权：个人身份数据是一种宝贵的商品，所以不管数据是在收集还是传输都必须被保护。每个国家都有法律规定的数据保护的指导方针，在收集任何数据包括个人信息时都必须遵循规定。环境传感器可能会无意地获取个人信息，比如在记录交通噪声的时候记录了人们之间的对话。不管意图如何，这些数据都必须被保护且在传输中使用安全措施。当数据在不同当事人之间被出售和转移时，数

据所有权问题就出现了。在健康领域，数据传输和隐私在任何伦理批准或者设备监管申请中是必不可少的考虑因素，因此在使用任何传感器技术之前必须得到认同。

4.5　小结

本章介绍了传感器网络及其拓扑结构，并描述了传感器网络中的软硬件部件，以及它们可以配置的方法。同时介绍了常见的传感器网络应用，包括个人局域网。最后，还对目前和将来传感器网络的挑战进行了探讨。

参考文献

Hongbo, Jiang, "Prediction or Not? An Energy-Efficient Framework for Clustering-Based Data Collection in Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 22 (6), pp. 1064–1071, 2011.

Misic, Jelena and Vojislav Misic, "Prologue: Wireless Personal Area Networks," in *Wireless Personal Area Networks: Performance, Interconnection, and Security with IEEE 802.15.4*, Chichester, England, John Wiley & Sons Ltd, 2008, pp. 3–16.

Chaos Computer Club. "*Chaos Computer Club breaks Apple TouchID*", Last Update: November 2013, `http://www.ccc.de/en/updates/2013/ccc-breaks-apple-touchid`

Serbanati, Alexandru, Carlo Maria Medaglia, and Ugo Biader Ceipidor, *Building Blocks of the Internet of Things: State of the Art and Beyond*, 2011.

Drahanský, Martin, "Liveness Detection in Biometrics," in *Advanced Biometric Technologies*, Chetty, Girija, Ed., InTech, 2011, pp. 179–198.

Israel, Steven A., John M. Irvine, Andrew Cheng, Mark D. Wiederhold, and Brenda K. Wiederhold, "ECG to identify individuals," *Pattern Recognition*, vol. 38 (1), pp. 133–142, 2005.

Lin, Jia-Ping, Yong-Sheng Chen, and Li-Fen Chen, "Person Identification Using Electroencephalographic Signals Evoked by Visual Stimuli," in *Neural Information Processing*. vol. 7062, Lu, Bao-Liang, Liqing Zhang, and James Kwok, Eds., Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 684–691.

Derawi, M. O., C. Nickel, P. Bours, and C. Busch, "Unobtrusive User-Authentication on Mobile Phones Using Biometric Gait Recognition," in *Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IIH-MSP), 2010 Sixth International Conference on*, 2010, pp. 306–311.

Conti, Mauro, Irina Zachia-Zlatea, and Bruno Crispo, "Mind how you answer me!: transparently authenticating the user of a smartphone when answering or placing a call," presented at the Proceedings of the 6th ACM Symposium on Information, Computer and Communications Security, Hong Kong, China, 2011.

Korotkaya, Zhanna, "Biometric Person Authentication: Odor", Lappeenranta University of Technology `http://www2.it.lut.fi/kurssit/03-04/010970000/seminars/Korotkaya.pdf`, 2003.

Gibbs, Martin D., "Biometrics: body odor authentication perception and acceptance," *SIGCAS Comput. Soc.*, vol. 40 (4), pp. 16–24, 2010.

Chigira, Hiroshi, Atsuhiko Maeda, and Minoru Kobayashi, "Area-based photo-plethysmographic sensing method for the surfaces of handheld devices," presented at the Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology, Santa Barbara, California, USA, 2011.

Spachos, P., Gao Jiexin, and D. Hatzinakos, "Feasibility study of photoplethysmographic signals for biometric identification," in *Digital Signal Processing (DSP), 2011 17th International Conference on*, 2011, pp. 1–5.

第 5 章　传感器数据处理和增强

智慧是适应变化的能力。

——史蒂芬·霍金（英国著名物理学家）

传感器已经融入到日常生活方方面面，并且产生巨大的数据量，而且会随着传感器数量的与日俱增使其变成大数据。所谓的大数据在近年来已受到广泛的关注，它利用信息通信技术（ICT）描述公司、政府、机构，以及个人产生的大量非结构化和半结构化数据。随着物联网（IOT）在我们日常生活中的应用逐渐增加，传感器有望成为最大的数据发生器之一。传感器产生的大数据将充分利用诸如云架构进行数据存储、处理和可视化。访问这些数据将变得普遍，尤其是通过移动设备。同时我们也能够结合其他数据源，以创新的方式揭示传感器数据的新意义。

数据的智能处理和基于内容的可视化是提供有意义和可操作信息的关键。描述方式应该通过数据增强而努力吸引用户，并且允许用户通过协作方式进行数据交互。图 5-1 显示了数据认知的基本要素。总的来说，这些要素能够帮助我们理解如何有效地利用传感器数据。在本章中，我们将着眼于采用各种不同的方法为终端用户处理、解释和显示传感器数据。

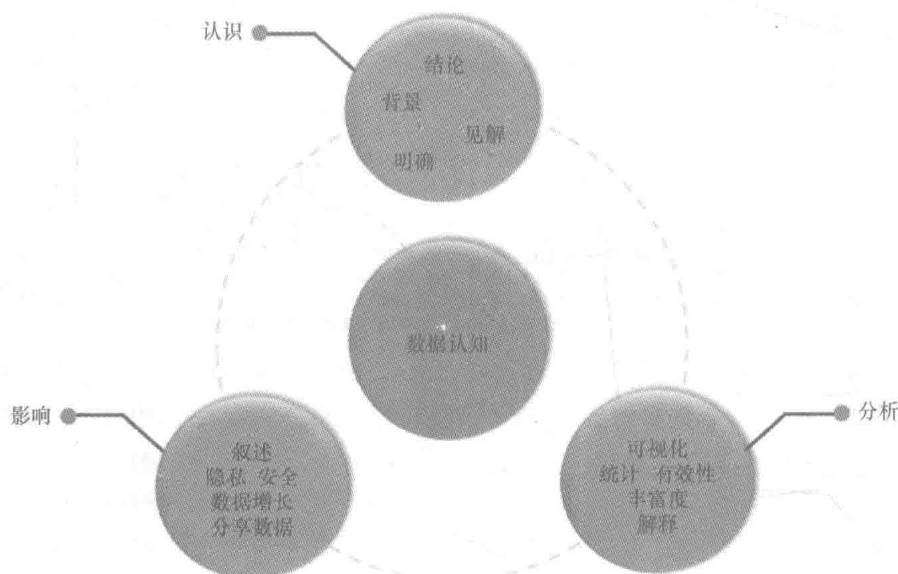


图 5-1　数据认知的关键要素

5.1　数据认知

只有当传感器数据能为我们所用时才有价值，而理解这些数据的含义是使用它们的前提。理解数据的过程被称为数据认知（Hart，2011），从一个角度看，它一般包括以下能力：

- 正确解读数据的可视化表现形式，如图形。
- 准确地分析数据，并从数据中得出正确的结论。
- 利用其他数据集添加相关信息。
- 了解数据是否被错误解释。
- 识别由于完全或间歇性传感器故障造成的数据不准确。

《纽约时报》估计，美国将需要额外的 14～19 万具有较强数据分析专业知识的工作人员来处理从科学和公共卫生到运动领域中获取的大量数据（Lohr，2012）。数据认知需要成为不仅仅是少数个人的范畴；它必须被嵌入在一个组织文化中，以确保决策者懂得数据内涵并可以应用它们（Shelton，2012）。

数据认知将成为一个更广泛的需求，不仅面向专家也面向普通人群。人们将需要理解移动、环境感知以及这种形式是如何影响隐私、安全和风险的。非技术用户通常不理解数据共享的安全隐患。因此，人们通过数据读取把握基于传感器的数据采集和共享数据增殖的含义将显得越来越重要（Shilton et al.，2009）。

数据认知有三个核心主题，如图 5-1 所示：了解数据分析的过程，了解数据的影响，以及获取数据有意义的信息。克莱夫·汤普森在他的文章《为什么我们要学习数据语言》中指出公共领域中的许多争论，如气候变化和公共卫生问题，往往最终退化为数据含义的争论。他提出，新的数据语法实际上是数据统计（Thompson，2010）。

数据认知也可以使个人能够利用传感器数据和其他辅助数据源来提供符合实际的观察和结论。开发内容可以简化为了解传感器预期的测量范围，并且可以推断超出此预期范围的测量故障。或者，如果可穿戴动态传感器数据显示该患者在测量前从事暂时提高他血压的体力活动，临床医师也许就能够忽略这个远程获取的高血压数据。数据结构为医疗保健相关的传感器测量提供相应的环境，也努力为传感器测量提供其他相关信息（Gonçalves et al.，2008）。如果我们可以从数据中提出正确的问题，并清楚地知道答案，我们就能够获得有关我们健康的丰富而有意义的信息。如果没有数据认知提供的解释，我们只能以“数字乱码，或数据沙拉”结束（Bradshaw，2012）。

5.2　物联网

物联网是一个无定形的概念，并随着技术设备连接的增长继续演变。物联网的

早期概念集中于以人为中心且具有联网功能的计算设备，如智能电话、平板设备、笔记本电脑等。然而，物联网已经成长为涵盖丰富设备的生态系统，包括传感器、智能服装、消费电子产品、公用事业仪表、汽车、街灯、广告招牌、建筑物等，所有这些现在都可以连接到互联网。其中最明确的物联网的定义来自于美国国家情报委员会（Swan，2012）：

“物联网，是事物的总体概念，尤其是通过互联网可读、可识别、可定位、可寻址和可控制的日常物品——无论是通过 RFID、无线局域网、广域网，或其他方式”。

物联网设备的数量已经超过了地球上人的数量，Cisco 公司估计，到 2020 年物联网设备总数将超过 500 亿（Cisco，2011）。物联网的关键驱动因素是传感器：离散传感器，如环境监测传感器；穿戴式传感器，如心电传感器；嵌入到设备的传感器，如智能电话中的加速度传感器。事实上，许多设备具有多个传感器。例如，个人活动监测装置可以结合运动传感器，诸如加速度传感器；生理传感器来读取心率；环境传感器以获得温度；以及采用 GPS 进行定位。然后所有这些数据流可以经由一个智能手机连接到互联网。

如 Xively（https：//xively. com/）之类的开始出现的平台可以让发烧友和企业直观地收集来自包括传感器在内的互联网设备的数据。Xively 支持数据的安全共享，建立数据协作，并提供可以在多个平台上数据可视化的工具。该平台已经被应用在家庭环境监测以收集和观测传感器数据流，包括气压、一氧化碳和温度。新的家庭环境监测传感器，比如蛋形空气质量检测器（AirQualityEgg，2013）也正在通过 Xively 提供物联网功能。一些如 Arduino 和 Electric Imp（designboom，2012）的流行平台，也提供传感器直接或通过智能手机连接互联网的功能。

实现传感器成为“因特网手指”还需要一段时间。为了充分实现这一目标，几个关键因素仍然有待解决。这些因素包括减少传感器的成本；提高电池的使用寿命；开发强大可靠的能量收集能力；构建更强大的无线数据传输能力；使得无线网络覆盖无处不在（例如 3G 和 4G）；开发数据分析和可视化工具，能够处理大规模、高频的传感器数据流；并最终了解如何在合适的环境下将数据流转换为有意义、实时、个性化的建议。

超越以人为中心的传感设施，通常被称为无所不在或普适计算的机器对机器（M2M）应用程序，将成为互联网传感的关键推动力。据估计，到 2020 年，相比于 2012 年的 13 亿设备，全球将有 125 亿 M2M 设备。除了环境监测与治理（水管理、智能城市、气候事件的监测等），它们将提供各种各样的应用。随着时间的推移，M2M 连接将改变我们的日常生活；改变我们如何与周围的世界互动，从我们的家庭环境到我们日常生活的地方。

5.3 传感器和云

云计算已成为信息技术中最活跃的领域之一；它已经开始改变企业管理使用计算和存储设备的方式。基于云的模型为计算、存储、应用资源、基础设施优化利用和降低成本提供灵活性和可扩展性。云计算有能力为传感器和传感器网络提供存储、处理和可视化的功能，如图 5-2 所示。该传感器可以是离散的或者是地理区域分布式网络的一部分，并具有高动态数据吞吐量。这种基于云的集成在多变场景下能够容纳不同用户和应用程序传感器资源的动态载入及共享。

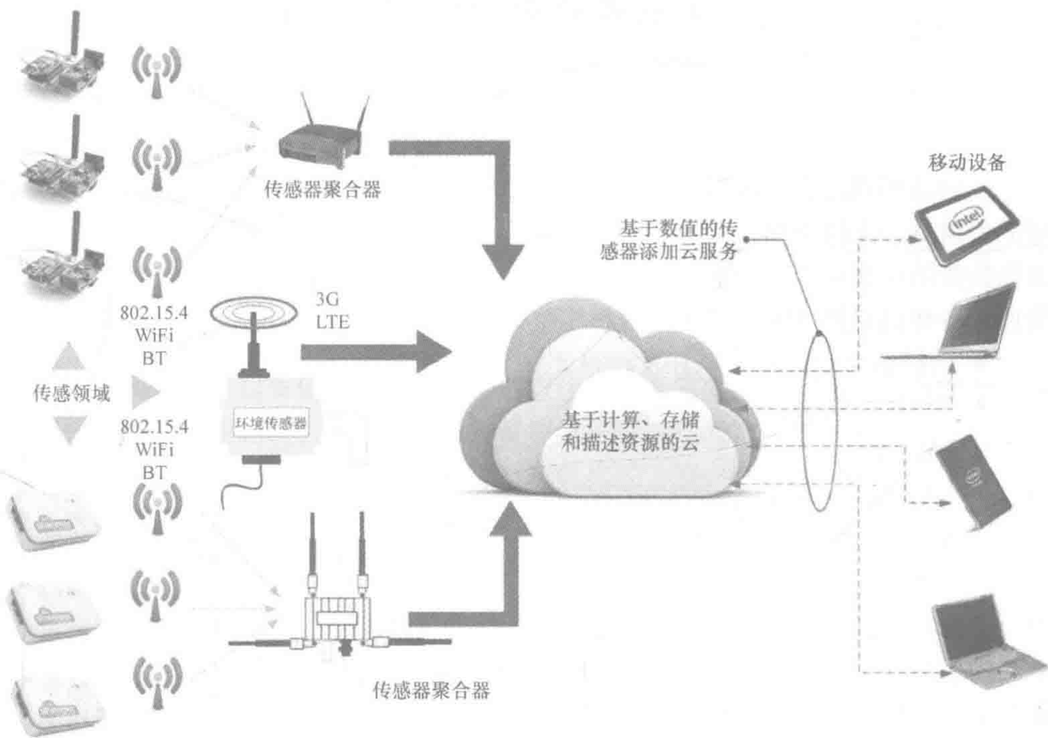


图 5-2　传感器云架构

智能城市作为传感器云应用领域已经被提出（Mitton et al.，2012）。例如，一个全市环境监测系统在异常天气条件下将需要巨大的计算和存储资源，但在这之后又将恢复到正常需求。基于云技术有可能降低传感器使用的总体成本，因为它可以轻松地支持弹性的资源消耗。云技术通常根据使用模式使应用开发人员来优化数据产生的频率和分辨率，从而降低成本。传感器数据的商业服务软件（SaaS）解决方案已经开始出现，包括来自 MicroStrain 公司（MicroStrain，2013）的 SensorCloud 系统和来自 temperature @lert 公司（temperature@lert，2012）的 sensorcloud。

海量的传感器数据可以使用云计算和存储资源处理、分析以及保存。一旦传感

器数据被存储在云中，基于聚合数据集的新应用就可以从不同组织资源或众包来创建。本质上，云可用于创建供任何用户或应用程序访问的虚拟传感器。这打破了目前普遍存在于许多传感器应用中的瓶颈。很多研究工作用于实现这个目标，其中包括 IBM 公司（Yuriyama et al.，2010）的 Sensor – Cloud，ANR 公司的 Cloud@ Home（Recherche，2011）和德国亚琛大学的 SensorCloud（Hummen et al.，2012）。

用户和应用程序在使用基于云的功能不需要关注传感资源的物理位置，因为它们本质上是虚拟化的。最终用户可以根据需要动态地使用和组合虚拟传感器，而且在不需要时轻松地停止使用它们。新的物理传感器可以通过注册被添加到云中。这个过程不仅包括类似于在第 3 章描述的换能器电子数据表格式的注册传感器特征值机制，还包括以 XML 格式描述传感器数据类型的方法，如 SensorML。

5.4 数据质量

任何传感器的成功应用都依赖于数据的质量。如果缺少对数据质量的信任，数据的价值就会大打折扣，并且它用于观察、诊断或可操作的价值就会受限。因此，确保数据的质量是任何传感器应用程序开发过程的一个重要的组成部分。在每一个阶段，各种因素都可能会影响应用程序生命周期中的数据质量：

- 传感器系统的设计、开发和验证。
- 使用。
- 协议设计。
- 数据处理和可视化。

一些问题可以通过传感器系统的精心设计而避免。严格控制的实施过程或活动管理策略可以主动识别影响数据质量的问题。在数据收集、处理、存储和传输过程中要考虑到数据的一致性、测量精度和可靠性的关键问题。主要目标应该是尽量减少或理想情况下消除普通和特定应用的数据缺陷。风险矩阵在优先考虑数据质量的影响上非常有用。在这个矩阵中，优先权通常分配到影响大和发生频率高的风险因素上。其次才是一些较小的影响因素，如异常检测。此优先顺序的依据是基于因素显著影响的程度。影响数据质量的关键因素已在表 5-1 中列出（Puentes et al.，2013）。

表 5-1 影响传感器数据质量的因素

因素	影　响
传感器限制	操作限制——例如对环境影响过于敏感 系统设计限制——例如数据吞吐量限制，处理瓶颈，通信可靠性
校准误差；漂移	所检测范围的错误校准，或者需要频繁校准以保持精确度 精确度随时间降低

（续）

因素	影 响
环境影响	由于温度、湿度、水分进入等造成性能变化 传感器材料的降解 恶意损坏传感器或测量环境 受到野生动物损坏 受到车辆损坏
故障传感器	传感器停止正常工作，导致错误输出
错误值	由于外部影响导致传感器测量不正确，如噪声
非合适协议	由于其复杂性无法正确使用测量协议。不清楚如何正确使用传感器。协议没有要求在周期或范围内获取数据。
人为影响	由于测量环境中人的位置而引起的结果扭曲 不正确地使用传感器：例如，在穿戴式应用中错误地使用电极
相关性	收集的数据是不相关或没用的
错误安装	错误的采样
信任和否定	无法保证数据源而限制数据值，特别是用于诊断目的。数据的可追溯性和鲁棒性安全是需要建立的

5.4.1 解决数据质量问题

识别和解决数据质量问题在传感器的应用中非常重要。各种潜在的干扰可以影响传感器读数的准确性，而且手动检查又非常乏味、耗时，并且不易扩展容纳更大范围的传感器使用。自动检测是最实用监测数据的方法。统计模型、机器学习和其他数据挖掘技术可用于识别实时或后处理过程中的不当或异常数据。它甚至能够消除异常点，并可以经过适当计算进行替换。下面将讨论一些常见的监测数据质量的方法。

1. 异常检测

异常检测，也被称为异常点或误差检测，通常用于监控数据质量和改进无线传感器网络的健壮性。这种方法通过判断测量结果是否在预期范围之外，来检测识别故障传感器或外部的恶意网络攻击。很多方法可以用来处理异常值。目测方法可以采用手动方法移除错误数据。另一种方法可以通过绘制数据的直方图或散点图来识别异常值。然而，这些方法都很耗时且可扩展性较弱。为提高效率，我们常使用模型法。这里有五个实用的方法（Zhang et al.，2010）：

- 统计建模：这种方法是基于所述数据在标准操作条件下的正态概率分布。实际数据根据该模型被评估是否正确。由模型确定的低概率的数据被归类为异常值。
- 邻近取样：此方法将数据值与它最近的邻值进行比较。计算传感器当前测量与先前测量之间的距离（例如欧几里得距离或相似性测量）。与邻近测量结果差距太大被认定为异常值。

• 聚类：在这种方法中，数据的实例被分成具有类似的行为或特性的簇。如果不符合预定的簇或者如果产生一个比其他簇显著小的簇，该数据的实例被识别为异常值。欧几里得距离常被用作两个数据实例之间相异性测量。

• 分类：这种方法是基于分类模型的设计，然后利用典型数据组对其进行训练。一旦模型按照预期数据分布进行了训练，它就可以将一个未知数据分到正常类或异常类中。如果采集了新的数据或者传感器或传感器系统改变了操作参数，所述分类器可以通过更新反映正常数据的新实例。开发分类器的常用方法，包括支持向量机（SVM）和 Bayesian 网络。

• 谱相分解：主成分分析（PCA）可以降低数据集的维数，转换成那些可以捕获数据的预期行为的成分，如变异性。成分落到这些结构以外的数据被认为是异常值。

当处理异常数据时，无论使用什么技术，明智的和客观的决策过程都是至关重要的。如果没有这样的决策过程，在异常值去除处理中总会有引入无意偏差的风险。通过明确识别，异常值及其使用的过程中产生的信息将被删除，从而确保任何处理的数据完整性。保留原始数据也是很有必要的（至少在一个特定的时间周期内），以便根据要求能够访问和解释这些数据。

2. 自动数据清理

利用机器学习、人工神经网络（ANN）和 k 最近邻（KNN）等聚类技术进行异常检测从而建立自动数据清理。这些技术基于与其相关的一组传感器读数来预测这一传感器的读数。基于该预测值，传感器测量值可以简单地舍弃或用另一个值取代（Ramirez et al.，2011）。这种方法最大的缺点是对于一个传感器实际测量异常值的排斥，特别是在测量精度至关重要时。这种方法产生的显著计算开销也使得与实时实现相比更适合于后处理的应用。

3. 可信度测试

一个可信度框架可以基于预定义的有效性，测试接收到的传感器读数是否可信。被使用的特征值预期的范围或阈值是利用设计为捕获在正常运行情况下的自然变化的统计模型定义的。考虑到预期时间变化，测试数据通常都是动态地进行更新。如测试数据的范围、持久性和随机性等特征会被检查是否符合一组给定条件下的预期限制。每个测试产生一个简单的二进制合格/不合格输出。可信度测试已经在环境监测领域得到了应用（Taylor et al.，2012）。

5.5 传感器数据融合

对于感兴趣的测量，不能依赖单一的传感器。因为测量往往含有噪声，是不完整的或者缺乏相关的信息。在某些情况下，可能无法直接测量感兴趣的数据，这样就需要一些其他的方法。传感器融合和虚拟传感器是两种被广泛地用于改善传感器

数据信息价值的方法。

在传感器融合过程中，传感器数据或者所导出的传感器数据与来自其他传感器或数据源的数据进行组合。所得到的信息优于单独使用传感器数据或其他来源的数据。在一些应用中，为了完全量化感兴趣的测量或为测量提供环境敏感度或环境意识，多传感器可能会被使用。例如，步行速度的非接触式测量，需要固定距离的多传感器以计算人经过的速度。传感器融合还可以为远程生理测量提供相关信息。在这种情况下，运动传感器可以通过心电图或血压等生理测量（Klein，2004 年）来判断一个人是否处于活动状态。

传感器数据流融合的方式基于应用要求、传感器分辨率和可用的处理资源。如果微控制器（MCU）有足够的计算能力，融合处理的过程可以发生在传感器系统水平。特别是必须实时检测时，数据融合就很有用。当然，如果实时监测不是必要的，在后期数据处理中，数据融合过程可以放在数据聚合器或者放在后端信息处理设备。

传感器融合的一个重要应用就是运动分析。3D 加速度计、3D 陀螺仪和 3D 磁力计也被用于运动相关的应用，比如跌倒检测。当单独使用时，这些传感器具有一定的局限性，影响精确度和灵敏度。例如，加速度计对在体位置敏感，它或许可能在受试者处于静止时产生一个信号。为了补偿各个传感器的局限性，一种传感器融合方法结合 3D 加速度计、3D 陀螺仪和 3D 磁力计信号以提供一个自由度（DoF）为 9 的运动捕捉解决方案。这种系统可以提供精确的运动分析功能，且比标准光学系统更加便宜和灵活（见第 9 章）。传感器融合也用于指南针应用、增强型导航和 3D 游戏（Ristic，2012）。传感器融合应用的增长很可能会持续下去。一些设备如含有支持多种传感功能的专用传感器集线器的智能手机、平板电脑和超极本，将使新的令人兴奋的应用的产生成为可能。

正如第 4 章所述，虚拟传感器是软件定义的传感器，而不是物理传感器。虚拟传感器的功能是提供一个抽象的量或不能被直接测量的量。这种测量可以被应用程序或用户在不需要了解传感器数据流的情况下使用（Kabaday，2008）。虚拟传感器和传感器融合是相关的，因为传感器融合过程需要创建一个虚拟传感器。然而，虚拟传感器只融合来自真实传感器数据流的数据。在智能手机上，设备方向就是使用由加速度计、磁力计和陀螺仪数据融合产生的虚拟传感器输出来检测的。正如本章前面所述，云计算的增长将促进虚拟传感器的发展，这可以产生大量新的虚拟化可观察的数据集。这些由黑客或发烧友创建的虚拟传感器将导致产生新的商业和公共领域的应用。

5.6 数据挖掘

从原始传感器数据中提取有用和可操作的信息是一个非凡的任务。数据挖掘是

传感器数据信息发现过程的重要工具。为了建立传感器测量之间的有效建模，数据挖掘是用来揭示数据间不明显的关系，并确定数据质量问题，如异常值。数据挖掘利用大量的技术，从传统的统计分析和最近邻聚类到一些更现代的技术，例如人工神经网络、决策树、Bayesian 网络。

在应用数据挖掘之前，数据通常需要某种形式的预处理，以解决诸如噪声、异常值、丢失的数据或从故障传感器获取的数据。在一些应用中，特别是那些需要实时或接近实时性能的应用，数据简化可能也是必要的。由一些传感器应用所产生的高容量数据，使整个数据集的保存极具挑战性，这要求在内存中实现最优算法性能。利用内存数据库实现应用性能的改善对于应用程序而言也是一个问题（Tan，2006）。传感器数据的预处理通常包含以下一种或多种活动：

- 数据清理或过滤，如降低噪声。
- 异常值检测和删除或替换异常数据。
- 通过统计抽样等技术去除冗余值以减小数据集。
- 使用如主成分分析（PCA）等方法减少数据的维数。
- 特征提取，如事件检测；例如，在心电图信号中识别 R 波最大值（QRS 点）。

数据的预处理可以分布式的方式发生在一个传感器节点或在聚合器节点，或以集中的方式发生在后端聚合器或传感器云上。如果传感器节点具有足够的计算能力和能量预算，初始数据处理就会在传感器节点中进行以降低传输的大小和频率。通过减少数据集，有助于提高数据挖掘算法的性能，对于数据的实时处理特别重要。

虽然各种的数据挖掘技术都可以应用到传感器数据，但它们可以合理地分为四大类（Duda et al.，2001）：

- 分类是基于机器学习的方法同时使用如决策树和神经网络等方法。它的基本原理是根据特征向量将某次测量分类到一组预定义类别中。在传感器测量不包含显著特征变化时，分类会表现良好。
- 聚类是基于一组共同特点将类似的传感器值结合在一起。有两种主要测量类型来估计组别的关联：距离（例如欧几里得距离）或者相似性测量。与分类将测量分到某一预定义组相反，聚类是根据哪一个测量应该被加入而定义类。常见的聚类方法包括：K 均值、模糊聚类和单链（邻近取样）。
- 回归确定可用来预测未知测量值的数据功能描述。最常用的回归是线性回归，其中该函数相对于该输入变量是线性的。
- 归纳法系统地标识所有可能的模式。准确性和显著性用来指示模式的鲁棒性以及它再次发生的概率。这大概是在无监督学习系统中信息发掘的最常见形式。

这些方法的最终目标是提供一种模型，它可用于解释现有数据，并且如果有必要，可以自动地预测未知的传感器值。鉴于可用方法多样性，其关键步骤就是确定用于给定数据组建模的最适方法。通过实践、经验以及一些专家指导，这个选择过

程应该变得更加直观。对于大多数应用来说，迭代过程用来优化被使用的特定技术。在一些情况下，需要一个以上的方法才能达到所期望的结果，尤其是在一个模型的输出成为另一个模型的输入时。

标准可视化技术，如典型的 2D 或 3D 条形图和线图，由于移动设备屏幕尺寸的限制、人视觉的限制和可用计算资源的限制等原因导致不成功。可视化数据挖掘方法运用像几何变换显示技术（如散点图矩阵）、密集像素显示技术、层叠式显示技术或图标显示技术来检查和解释大数据集从而解决这些限制。可视化数据挖掘一般有三个用途：

- 以图形的形式呈现数据，让用户深入了解数据。
- 验证性分析，让用户在通过与数据的直接互动而获得了解的基础上，确认或拒绝分析假设。
- 探索分析，导致新假设的发展。

在交互过程中呈现审查数据，采用图形化的形式可以促进对数据集产生新的意义。它可以提供一个更深入的了解，而使用标准的数据挖掘技术不容易辨别。这种方法已被应用于各种领域，包括石油工业和 IT 取证，并且能与大规模的传感器数据一同使用（Rodriguez et al.，2012）。关键要求一个演示工具产生初始视图，导航具有复杂结构的数据集，并提供分析结果。许多分析方法不包括可视化或具有有限的可视化功能。随着可视化数据挖掘应用的不断成熟，数据可视化就会不断发展超出目前的局限性而成为功能强大而灵活的工具。

医疗保健和环境传感器应用领域，数据挖掘都可以有意义的应用。无论是在医院内外，用来监控病人病情的传感器会生成大量数据。这些数据集可能会继续保持增长。然而，尽管它们有潜力来为患者未来的福祉提供新见解，但是在有严格时间要求的情况下，这样的数据集被利用的情况千差万别（Sow et al.，2013）。同时，不同类型的传感器已被用于环境监测。同样地，超大量的传感器数据正在通过对空气、水、气候、土壤、生态监控而产生。这些数据集，如果能仔细地通过数据挖掘被正确应用，可以用来判断环境和气候短期或长期的趋势。通过事件的检测和因果关系的揭示，在环境受到威胁而引起我们健康和保健受到威胁的情况下，这些数据将使我们能够更好更主动地适应环境（Karpatne et al.，2013）。但是，如第 11 章所述，完全实现有着巨大的挑战。例如，Argo 计划已经在海洋中使用了一个具有 3660 个包含温度和盐度传感器漂浮物的球形阵列。该项目为气候、气象、海洋和渔业研究提供实时数据（Argo，2013）。面临的挑战是如何扩展传感检测技术，其中包括其他感兴趣的检测对象，例如 pH 值、氧气和硝酸盐的水平。开发可以在这种恶劣的环境下自主运行、可靠、准确的传感器在技术上具有挑战性并且花费昂贵（West，2011）。

传感器的数据挖掘包括巨大的间接成本，包括 IT 基础架构、软件工具和许可证，以及随着时间保持和更新基础构架的网络和员工。因此，不断地询问数据是否

在正确的采样率被正确的采集很重要。如果它不能被用来驱动有意义的行动，收集和挖掘数据就变得毫无意义。在数据挖掘和相关费用的投资是否获得回报的问题也需不断提起。如果所得到的信息并没有真正的预测价值，采用各种复杂的方式挖掘大量传感器数据的作用也就有限。数据挖掘过程的输出也应在分析的基础上用于验证后续操作。这也将有助于持续地确定这些措施的效用。只有当它补充并加强了分析处理的质量，收集更多的传感器数据才是有用的。如果作为已知分析的替代，它就变得适得其反。

5.7 数据可视化

一般情况下，与数值或文本相比，人们更喜欢图形和视觉效果。视觉表现帮助解决如信息过载或数据过剩等问题。它们让人们更容易看到有意义和重要的模式或关联。如果使用适当，数据可视化会成为传感器数据处理增值链的关键组成部分，因为它增强数据。在组织水平或影响个人的行为水平，它支持模式识别，并在改变传感器数据作用方式上充当主催化剂（例如，启动和维持足够的身体活动水平）。由于可视化过程使我们能够将各种信息源聚合在一起，包括非传感器源，所以相关信息可以通过诠释过程被添加。最终，可视化让我们创建一个关于讲述数据故事的设计（McCandless，2013年）。良好的设计，特别是在健康和保健领域，通常利用相关数据，这些数据将传感器数据与对等数据集或值相连接，从而可以产生一个完整和合格的图像，而不是一个可能会产生误导的绝对值。可视化传感器数据以吸引人的方式使个人可以评价或识别对他们的健康有益的行为（见图5-3）。

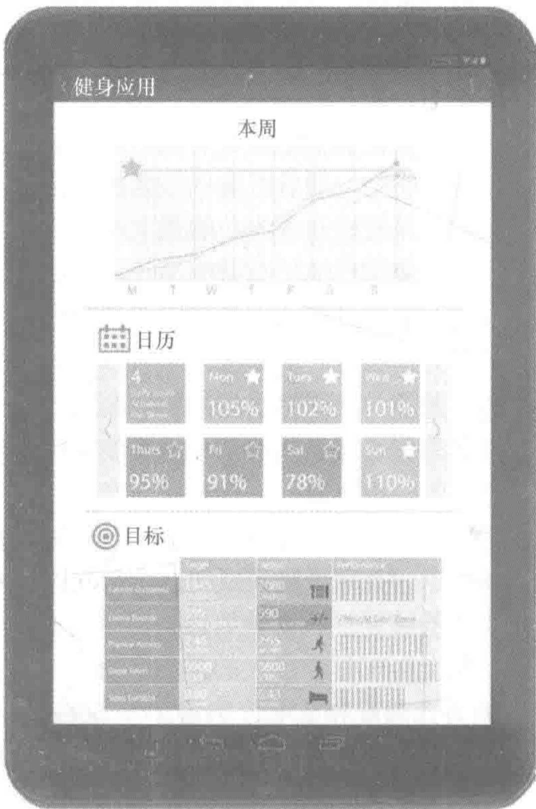


图5-3 个人活动记录的手机可视化应用程序可随时记录人的生活方式

有效的可视化方法根据情景而各不相同。例如，三维可视化通常需要更高的分辨率，这可能会对较小的显示有一定的限制。因此匹配用户的可视化意愿很重要——例如，不同视图取

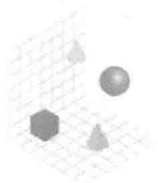
决于特定情景（观看设备）——当在解决一个有意义的现实世界中的问题时（Richter，2009）。根据不同的基础数据集的构成，这里可使用七个潜在的可视化类别（Sheiderman，1996），如图 5-4 所示。



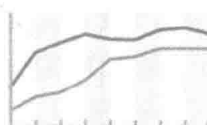
一维图(长条图)



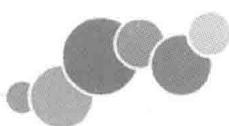
二维图(XY坐标图)



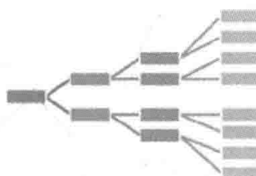
三维图



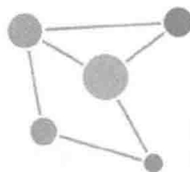
时间图(时间折线图)



多维图



树图



网络-(节点和连线)

图 5-4　基于潜在数据类型的可视化的七种类型

一维、二维、三维表示是组织基于特征组合的传感器数据集的常用方法，这些特征组合包括频率、幅度等属性的时间或空间成分。多维数据集的可视化可能需要以某种方式改变维数，无论是减少维数进行显示或分离成不同维数的组件进行显示。这种方法在处理必须被转变为二维或三维进行可视化的高维数据集时特别有优势（Rodrigues et al.，2010）。时间表达是最熟悉的可视化的方法之一，是因为该数据包含了明确的开始和结束时间，并且可以通过时间轴来表示。

如果不能在没有丢失信息的情况下减少数据的维度，多维的可视化方法是必需的。这往往涉及创建虚拟传感器或其他信息源来为传感器测量添加相关信息。这些可视化的形式通常用于特定应用。例如，可视化可以以树的形式在一个分级结构中融合地理空间和制图数据的环境传感器数据。这些在用于演示聚集值或虚拟传感器读数或类似传感器组之间关系的整个演变过程都是非常有用的。网络和树在它们怎样关联传感器测量上有相似之处，但在无分级的方式中也是如此。

随着传感器使用规模的增长，对可视化分布式传感器网络如无线传感器网络（WSN）的需求将会增加。许多为解决这一需求所做的努力已经有所报道。超感知（HiperSense）的设计是为了提供可扩展的传感器数据可视化，它具有处理多达6200条独立数据流的能力（Chou et al.，2009）。在环境感知领域，Teris等人讨论了基于被用来监测土壤温度和湿度的MicaZ微粒环境监测系统。数据结果使用微软研究院传感器地图（SensorMap）进行可视化，它可以通过Web服务接口来访问微粒的地理坐标。这允许用户查找特定的传感器位置，并深入到该位置的当前和历史测量，同时提供一个带有地理有关信息的微型和宏观的数据视图（Terzis et al.，2010）。

另一种流行的传感器数据可视化工具是谷歌融合表（Google's Fusion tables）。融合表是一个基于Web的允许用户收集、可视化和共享大型数据表的应用程序（Bradley et al.，2011，Fakoor et al.，2012）。一旦数据被收集，用户就可以使用多达几十万过滤器，并跨行创建摘要。用户可以使用图表、地图或自定义布局可视化数据，并将可视化效果嵌入在网页中与他人分享。该工具允许人们上传各种环境数据集，如空气和水的质量数据以及其他定量数据。它也被研究人员使用，如卡内基梅隆大学（CMU）创新实验室Waterbot计划的研究人员使用它可视化来自使用在匹兹堡Nine Mile Run流域的水质传感器（温度和电导率传感器）数据，如图5-5所示。研究人员使用谷歌融合表相对参考传感器（Solinst）提供的传感器数据，并与地理采样地图映射。他们已经能够识别电导率峰值对应的是污水溢流事件还是强降雨事件。在Climate Code的一篇博文中，Illah Nourbakhsh教授称赞卡内基梅隆大学描述的谷歌融合表是全民科学的关键推动者。他概述了来访问基于Web的数据收集和可视化来实现数据民主化，并赋予公民做出关于环境的明智决策的权利（Nourbakhsh，2012）。

在健康和保健领域，挖掘和可视化纵向数据集的能力，如屋内的行为模式，可以提供关于异常行为和健康相关问题的早期迹象（Lotfi et al.，2012）。这个领域的可视化设计应该同时容纳个人和同组别标准。请记住我们都是具有独特生物特性的个体，所以采用的设计必须精挑细选以防止“装载”产生狭隘的表达和限制性表达，从而不能反映个体的复杂性。

可视化为推动热门领域的认识提供了有用的工具。但是，最终它的作用是通过构建精确和合适的模型产生正确结果的能力所决定的。可视化是一个强大而有效的

工具来添加结构传感器数据集，并且能将大量的知识压缩成直观可视化信息。可视化只能在正确构造问题的基础上提供答案和见解。然而它不能使混乱的数据清楚。它需要精心指导以保证数据的正确解释。在未来，数据可视化将超越当前相互作用的静态模式变成更多的互动模式，它可以使个人与数据交互。增强现实解决方案，如谷歌眼镜，可以增强我们对世界的看法及影响我们的可视化数据实时传递。最终，可视化是为了增强传感器数据，所以我们可以与之关联，并讲述与之相关有意义的故事。

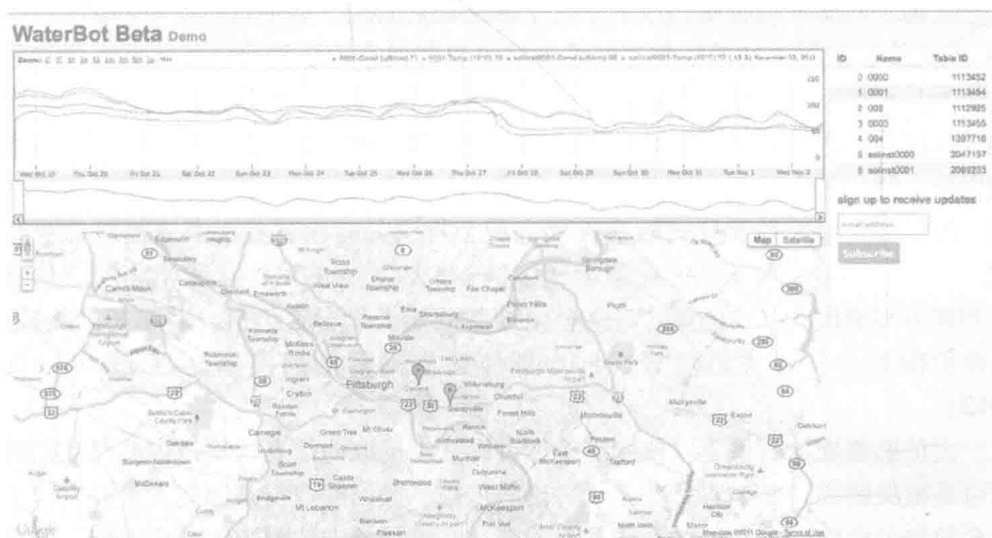


图 5-5　利用谷歌融合表的水质传感器检测的可视化（已取得卡内基梅隆大学创新实验室许可）

5.8　大传感数据

大数据是一个在商业分析世界中具有相当牵引力的流行语。大数据被认为是“新的石油”，当然，这有些用词不当。数据并不是像石油那样的有限资源。其实正好相反，新的数据每天都在创建（Thorp，2012）。这是难以避免的事实，我们每天都在从互连设备产生以个人和系统为基础的数据。据 IBM 称，人类及其配套基础设施建设每天产生 2.5 万亿（quintillion）字节的数据（IBM，2013）。无论“大数据”是一个真正的新现象，还只是技术社会不断进化的一部分，它可能一直是商业智能分析的供应商、行业资深人士和学者争议的焦点（Few，2012）。

传感器在我们生活的各个方面的扩散——包括智能手机、穿戴式传感器、家庭监测和未来智慧城市——往往是用来说明传感器如何和将要如何成为大数据增长的一个关键因素。实现新的传感器收集数据不包括收集新的数据类型是非常重要的。相反，它将简单地添加到现有传感器数据的总体累积效应中。传感器只会随着新技

术的出现而引起数据源不断增加。尽管它们将会使相同测量类型的容量增加，但是同时更为普遍地被使用。大部分大数据源通常以自动方式产生数据，无需人工干预。自动感知确实已经应用在健康和保健领域（如室内活动监测）。与此同时，一个重要的人机交互元素存在于传感过程中，例如，生理感测如血压或血液生化监测（比如，对糖尿病的控制）。尽管在健康和保健相关传感中存在大的“手动”元素，但产生的数据容量依然持续增长。在这些领域数据的另一个特点是它所引起的高层次的互动和参与。人们常常对数据有强烈的个人所有权意识，并且可以非常积极地与它互动，同时与同组或其他汇总数据源比较它们的“数字”。

“大传感数据”的独特类别已经开始出现在具有传感器功能的智能手机和平板电脑上，再加上基于云的服务，这使资深用户反馈成为可能（Lane et al.，2010）。在医疗领域，大规模数据集带来了挑战，例如那些可以由智能手机传感器产生的数据——特别是对于其中数据挖掘的方式。人口水平数据通常可具有降低人们之间差异的效果，这对基于分类的系统而言是个特别大的问题。这个问题通常被称为“分级多样性问题。”正如上一节中所述，一个人独特的生物学和生物力学构成性使创建可归纳模式非常困难。广义模型通常只能提供参考价值，而不是诊断价值，诊断价值需要针对常见流行病的小群体建立高精度的模型（Campbell et al.，2012）。

大传感器数据的价值仅仅取决于你可以从中提取的信息。正确地解释数据的能力也是很关键的，并如本章前面所讨论的依赖于人们的数据认知能力。缺乏这一认识会导致公众的混淆，造成不必要的争辩。新的分析方法不一定是必需的。尤其是需要实时分析的情况下，增强现有工具对于处理和分析大型传感器数据量以提供所需的性能将是必要的。现有分析解决方案可以处理时间传感器测量值，但难以使数据集与其他数据源快速关联。新一代大数据分析工具，包括 NoSQL 数据库、Hadoop和 MapReduce，都是为了满足这些要求。Hadoop 的开源栈使用一个简单的编程模型，使计算机集群分布式处理大型数据集。Hadoop 栈包括实用程序、分布式文件系统、分析和数据存储能力，以及应用层。这些功能支持分布式处理，并行计算，以及工作流程和配置管理。MapReduce，软件编程框架基于 Hadoop 栈，通过给程序员一个跨计算机集群定义和编排复杂处理任务的常用方法，简化了大型数据集处理。

大数据分析仍然活跃在越来越多的研究领域。例如，爱尔兰国家研究机构爱尔兰科学基金会最近公布的洞察力中心所花费用超过 7500 万欧元。该中心的核心任务是针对重点应用领域开发新一代的数据分析技术，如医疗和传感器网络（Insight，2013）。这是在国家的历史上最大的 ICT 研发投入，这展示了大数据分析对国民经济的战略重要性。在该研究领域，活跃主题包括算法技术模拟高维数据，大量动态数据集的知识发现，以及自动假设生成的方法。在数据存储研究中，重点是数据表达、数据存储、数据检索以及新的并行数据结构，包括云。

大传感数据的价值只能通过自下而上的方法进行系统地实现。这种做法始于基本原则：我们要衡量什么和我们如何衡量？将数据收集扩展到大样本量就会使我们能够看到非常重要的模式和关联。这一过程将推动我们探索数据发现，这反过来会促使创新的步伐不断加快。

5.9 小结

在本章中，我们介绍了数据认知的重要性和提取我们周围的环境、医疗或健康新知识所需的步骤。将传感器数据转化为可操作信息的处理过程包括：数据准备、挖掘和可视化。但要实现这一过程的价值，人们需要有足够的数据认知能力来理解传感器可以提供的信息。我们还看到了可视化处理如何成为数据增强的关键因素。这个过程可有助于将数据转化为使个人、团体和组织与同一数据集相连接。我们已经看到，通过互联的世界和物联网的出现，传感器的数据量越来越大，正导致着“大传感数据”现象的出现。这些大型数据集的价值多少由它的质量和是否采用了准确及符合实际的方式测量到了感兴趣的对象信息所决定。

参考文献

Hart, Robert V. "*Data Information Literacy?*," Last Update: July 26th, 2011, http://esciencecommunity.umassmed.edu/2011/07/26/data-information-literacy/

Lohr, Steve. *The Age of Big Data*, The New York Times, New York, http://www.nytimes.com/2012/02/12/sunday-review/big-datas-impact-in-the-world.html?pagewanted=1&_r=1, 2012.

Shelton, Steve. "*Building a Big Data workforce: how can we get started?*" [Blog]. Last Update: 17th August, 2012, https://www.baesystemsdetica.com/news/blogs/building-a-big-data-workforce-how-can-we-get-started/

Shilton, Katie, *et al.*, "Designing the Personal Data Stream: Enabling Participatory Privacy in Mobile Personal Sensing," presented at the 37th Research Conference on Communication, Information, and Internet Policy (TPRC 2009), Arlington, Virginia, 2009.

Thompson, Clive, "Why We Should Learn the Language of Data". *Wired Magazine*, (May), 2010

Gonçalves, Bernardo, José G. Pereira Filho, and Giancarlo Guizzardi, "A Service Architecture for Sensor Data Provisioning for Context-Aware Mobile Applications," presented at the ACM Symposium on Applied Computing (SAC '08), Fortaleza, Ceará, Brazil, 2008.

Bradshaw, Leslie. "*Data Dreaming*," Last Update: December 14th, 2012, https://medium.com/american-dreamers/4ee4351f8aab

Swan, Melanie, "Sensor Mania! The Internet of Things, Wearable Computing, Objective Metrics, and the Quantified Self 2.0," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 1 pp. 217-253, 2012.

Cisco. "*The Internet of Things*," Last Update: 2011, http://share.cisco.com/internet-of-things.html

AirQualityEgg. "*AirQualityEgg*," Last Update: 2013, http://airqualityegg.wikispaces.com/AirQualityEgg

designboom. "*Electric Imp for the Internet of Things*," Last Update: May 17th 2012, http://www.designboom.com/technology/electric-imp-for-the-internet-of-things/

Mitton, Nathalie, Symeon Papavassiliou, Antonio Puliafito, and Kishor S. Trivedi, "Combining Cloud and Sensors in a Smart City Environment," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2012 (247), 2012.

LORD MicroStrain, "SensorCloud," http://www.sensorcloud.com/, 2013.

temperature@lert. "*Temperature@lert Sensor Cloud Tour*," Last Update: 2012, http://www.temperaturealert.com/Remote-Temperature/Sensor-Cloud/Sensor-Cloud-Tour.aspx

Yuriyama, Madako and Takayuki Kushida, "Sensor-Cloud Infrastructure - Physical Sensor Management with Virtualized Sensors on Cloud Computing," in *Network-Based Information Systems (NBiS), 2010 13th International Conference on*, 2010, pp. 1-8.

Agence Nationale De La Recherche, "Clouds@Home," http://clouds.gforge.inria.fr/pmwiki.php?n=Main.HomePage, 2011.

Hummen, René, Martin Henze, Daniel Catrein, and Klaus Wehrle, "A Cloud Design for User-controlled Storage and Processing of Sensor Data," presented at the IEEE CloudCom, Taipei, Taiwan, 2012.

Puentes, John, Julien Montagner, Laurent Lecornu, and Jaakko Lahteenmaki, "Quality Analysis of Sensors Data for Personal Health Records on Mobile Devices," in *Pervasive Health Knowledge Management*, Bali, Rajeev K., Indrit Troshani, and Steve Goldberg, Eds., New York, Springer, 2013, pp. 103-134.

Zhang, Yang, Nirvana Meratnia, and Paul Havinga, "Outlier Detection Techniques for Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 12 (2), pp. 159-170, 2010.

Ramirez, Gesuri, Olac Fuentes, and Craig E. Tweedie, "Assessing data quality in a sensor network for environmental monitoring," in *Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS), 2011 Annual Meeting of the North American*, 2011, pp. 1-6.

Taylor, Jeff R. and Henry L. Loescher, "Automated Quality Control Methods for Sensor Data: A Novel Observatory Approach," *Biogeosciences*, vol. 9 (12), pp. 18175-18210, 2012.

Klein, Lawrence A., *Sensor and Data Fusion - A Tool for Information Assessment and Decision Making*. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2004.

Ristic, Lj. "*Sensor fusion and MEMS for 10-DoF solutions*," Last Update: 3rd September, 2012, http://eetimes.com/design/medical-design/4395167/Sensor-fusion-and-MEMS-technology-for-10-DoF-solutions

Kabaday, Sanem, "Virtual Sensors: An Intutive Programming Abstraction," in *Enabling Programmable Ubiquitous Computing Environments: The DAIS Middleware*, Ann Arbour, Michigan, ProQuest LLC, 2008, pp. 36-57.

Tan, Pang-Ninh. "*Knowledge Discovery from Sensor Data*," Last Update: March 1st, 2006, http://www.sensorsmag.com/da-control/knowledge-discovery-sensor-data-753?page_id=1

Duda, Richard O., Peter E. Hart, and David G. Stork, *Pattern Classification*, 2nd ed. New York: Wiley-Interscience, 2001.

Rodriguez, Claudia C. Gutiérrez and Anne-Marie Déry-Pinna, "Visualizing Sensor Data: Towards an Experiment and Validation Platform," in *Human-Centred Software Engineering*, Winckler, Marco, Peter Forbrig, and Regina Bernhaupt, Eds., Heidelberg, Springer-Verlag, 2012, pp. 352-359.

Sow, Daby, Deepak S. Turaga, and Michael Schmidt, "Mining of Sensor Data in Healthcare: A Survey," in *Managing and Mining Sensor Data*, Aggarwal, Charu C., Ed., New York, Springer US, 2013, pp. 459-504.

Karpatne, Anuj, *et al.*, "Earth Science Applications of Sensor Data," in *Managing and Mining Sensor Data*, Aggarwal, Charu C., Ed., New York, Springer US, 2013, pp. 505-530.

Argo. "*Argo - part of the integrated global observation strategy*," Last Update: 2013, http://www.argo.ucsd.edu/About_Argo.html

West, Amy E. "*Widespread floats provide pieces of the oceanic productivity puzzle*," Last Update: October 28th 2011, http://www.mbari.org/news/homepage/2011/johnson-floats/johnsonfloat.html

McCandless, David. "*Information is Beautiful*," Last Update: 2013, http://www.informationisbeautiful.net/tag/health/

Richter, Christian, "Visualizing Sensor Data - Media Informatics Advanced Seminar on Information Visualization," University of Munich, Munich, http://www.medien.ifi.lmu.de/lehre/ws0809/hs/docs/richter.pdf, 2009.

Shneiderman, B., "The eyes have it: a task by data type taxonomy for information visualizations," in *Visual Languages Proceedings., IEEE Symposium on*, 1996, pp. 336-343.

Rodrigues, Pedro P. and João Gama, "A Simple Dense Pixel Visualisation for Mobile Sensor Data Mining," in *Knowledge Discovery from Sensor Data: Second International Workshop, Sensor-KDD 2008*, Vatsavai, Ranga Raju, Olufemi A. Omitaomu, João Gama, Nitesh V. Chawla, and Auroop R. Ganguly, Eds., Heidelberg, Springer, 2010, pp. 175-189.

Chou, Pai H., Chong-Jing Chen, Stephen F. Jenks, and Sung-Jin Kim, "HiperSense: An Integrated System for Dense Wireless Sensing and Massively Scalable Data Visualization," presented at the Proceedings of the 7th IFIP WG 10.2 International Workshop on Software Technologies for Embedded and Ubiquitous Systems, Newport Beach, CA, 2009.

Terzis, Andreas, *et al.*, "Wireless Sensor Networks for Soil Science," *International Journal of Sensor Networks*, vol. 7 (1) pp. 53-70, 2010.

Bradley, Eliza S., *et al.*, "Google Earth and Google Fusion Tables in support of time-critical collaboration: Mapping the deepwater horizon oil spill with the AVIRIS airborne spectrometer," *Earth Science Informatics*, vol. 4 (4), pp. 169-179, 2011.

Fakoor, Rasool, Mayank Raj, Azade Nazi, Mario Di Francesco, and Sajal K. Das, "An Integrated Cloud-based Framework for Mobile Phone Sensing," presented at the Proceedings of the first edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing, Helsinki, Finland, 2012.

Nourbakhsh, Illah, "*Citizen Science for Watershed Action: Big Data Meets Fusion Tables*," The Climate Code, Last Update: March 13th 2012, http://www.theclimatecode.com/2012/03/guest-post-citizen-science-for.html

Lotfi, Ahmad, Caroline Langensiepen, Sawsan M. Mahmoud, and M. J. Akhlaghinia, "Smart Homes for the Elderly Dementia Sufferers: identification and Prediction of Abnormal Behaviour," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 3 (3), pp. 205-218, 2012.

Thorp, Jer. "*Big Data Is Not the New Oil*," Last Update: 2012, http://blogs.hbr.org/cs/2012/11/data_humans_and_the_new_oil.html

IBM. "*What is big data*," Last Update: 2013, http://www-01.ibm.com/software/data/bigdata/

Few, Stephen, "Big Data, Big Ruse". *Visual Business Intelligence Newsletter*, vol. July/August/September, 2012, http://www.perceptualedge.com/articles/visual_business_intelligence/big_data_big_ruse.pdf

Lane, Nicholas D., *et al.*, "A survey of mobile phone sensing," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48 (9), pp. 140-150, 2010.

Campbell, Andrew and Tanzeem Choudhury, "From Smart to Cognitive Phones," *Pervasive Computing*, vol. July-September, 7-11, 2012

Insight. "*The Insight Centre for Data Analyticsn*, Last Update: 2013, http://www.insight-centre.org/about/mission

第6章　法规与标准：传感器技术的注意事项

所有基于传感器的设备，特别是医疗设备，需要有一定程度的法规，以确保它们在电气、化学、生物和物理特性上对终端用户来说是安全的。所需的法规程度取决于与该设备相关联的风险水平。植入设备，例如心脏起搏器，比非侵入式的温度计需要更严格的法规。在开发或使用健康、保健和环保的设备时，了解该设备的注意事项是非常重要的。事实上，因为某些医疗设备存在潜在的风险，所以不通过适当法规程序销售的产品都是非法的。地域和特定领域标准提供基准，使得装置的兼容性、互操作性、安全性和质量可以被检测。鉴于领域广泛，不可能列出所有涉及健康、保健和环境传感器的标准。所以，本章将基于实例介绍法规和标准的热门话题，参考一些在这个领域应用最普遍的法规和标准。

传感器是任何需要检测的医疗设备的关键部件。如在第3章所讨论的，传感器可以是分开的独立器件（比如家用试剂盒），或者嵌入至其他设备，如智能电话。大多数基于传感器的医疗设备需要与用户直接接触，因此确保不会对用户造成任何潜在危害是非常重要的。传感器产生医学敏感数据，它必须被保护或以安全的方式共享。传感器数据也会给出临床和非临床决策，使它们的精确度成为关键需求。即使对于最简单的传感器设备，给出设备符合标准和法规的风险评估是至关重要的。

法规的水平是不同的，取决于设备是否用于研究或生产。例如，CE（符合欧洲标准）认证标记是研究性设备不需要的，而是出售的设备所必需的。研究用的设备必须标有“Exclusively for Clinical Investigation（专为临床研究）”。道德审查应始终寻求非CE认证医疗设备的临床调查，并从最终用户处获得知情同意书。

6.1　医疗设备法规

在讨论医疗设备的标准和法规之前，理解这两个术语之间的差别是必要的。国际标准化组织对标准的定义如下：

在经常和反复的使用中构成了活动或其结果的规则、原则或特征，并由共识确立或者公认机构批准的文件，其目的是在既定的环境中实现最佳程度的秩序。

对法规的定义如下：

被权威机构采用的一份具有法律约束力的文件。

实际上，法规具有法律地位，但标准却没有。因此，医疗设备必须符合它们所销售地区的法规。

术语“医疗设备”描述的产品范围广泛，从简单的绷带到可植入起搏器。虽

然该术语的范围广，但是医疗设备销售时都需要遵守销售规定。医疗设备法规的过程是由国家或国际法规机构管理，如美国食品药品监督管理局（FDA）或欧盟（EU）合格评定机构。虽然是对医疗设备的安全性和制造的监管要求在大多数国家类似，但它们不是完全相同的。因此，设备想在某个特定的司法区域内上市或出售，就必须接受当地的法规程序。本节将以美国 FDA 程序和欧盟医疗设备指令为例概述医疗设备的法规。

6.1.1　CE 认证

CE 认证表明产品符合欧盟法律，并可以在欧洲经济区（EEA），即欧盟 27 个成员国加上冰岛、挪威、列支敦士登和土耳其的范围内进行销售。CE 标志是制造商声明产品符合欧盟指令的要求。它出现在所有产品上，从玩具、灯泡到个人计算机。CE 标志并不表示该产品是在欧洲经济区内生产的，而只是表明它满足了在那里出售的要求。在欧盟，所有医疗设备必须带有 CE 标志。为了获得 CE 标志，医疗设备必须符合下列指令中的一条：

- 关于主动植入式医疗设备的规定 90/385/EEC。
- 关于医疗设备的规定 93/42/EEC。
- 关于体外诊断医疗设备的规定 98/79/EC。

欧盟医疗设备指令，又称 MDD 或 93/42/EEC（EU，1993）是基于传感器的设备中最常用的指令。MDD 是一个复杂的文件，由 23 项条款、12 个附件和 18 组分类规则组成。因此，强烈建议与你国家的“认证机构”或监管机构密切合作，确保指令中的所有条件得到满足。在较高的水平看，医疗设备要获得 CE 认证可概括为六个步骤（EC 企业和工业）：

1）指令：确定你的设备是医疗设备，即满足 MDD 第 1 条中的定义，并且没有任何超出文中应用的范围。确认你的设备是不是主动式医疗设备（在这种情况下，指令 90/385/EEC 适用）或体外诊断医疗设备（在这种情况下，指令 98/79/EC 适用）。

2）确认要求：该设备必须满足列于 MDD 的附件 Ⅰ 中的基本要求。符合这些要求，必须由临床评估根据 MDD 中的附件Ⅹ证明。注意：一件产品可能需要符合多个指令（如化学物质或环境上的横向法规）；因此，还必须满足这些指令的要求。

3）认证机构的需求：当设备被归类为Ⅱ级（中等风险）或更高，认证机构必须证明设备的合规性；或作为Ⅰ类（低风险），Ⅰ类可以在市场上直接展示。设备分类的定义在 MDD 的附录Ⅸ中。认证机构的作用在 MDD 中的第 16 条被定义。

4）检查一致性：一致性评定程序取决于医疗设备的分类。这些程序列在 MDD 的附件Ⅱ ~ Ⅶ，而制造商可以选择申请适用自己产品的程序。一致性程序涵盖设备的设计到生产。制造商必须提供设备的设计如何满足基本要求的客观证据，详见

MDD 的附件Ⅰ。文件化的质量体系必须到位，以确保设备继续符合基本要求。对于Ⅱa、Ⅱb 和Ⅲ类的设备，认证机构必须验证，并证明该制造商的质量管理，来评估该设备是否符合基本要求。未放置在市场上在无菌条件下的Ⅰ类设备可以自认证。不管采用什么认证方法，制造商必须在标准声明（DoC）中声明其产品符合 MDD，并承担全部责任。

5）技术文档：技术文档（又称为设计档案）必须说明设备如何符合 MDD 的要求。该文件必须由制造商在提交申请给认证机构前提供，或者至少在设备上市前提供。制造商必须在最后一件产品投入市场后保存技术文件的副本至少五年。

6）加贴 CE 标志（见图 6-1）：当必要的步骤已经成功完成时，CE 标志必须明显地放置在医疗设备上。如果无法做到，则必须将其放置在包装盒附属文件上。如果涉及合格评定程序也必须显示认证机构的标识号。

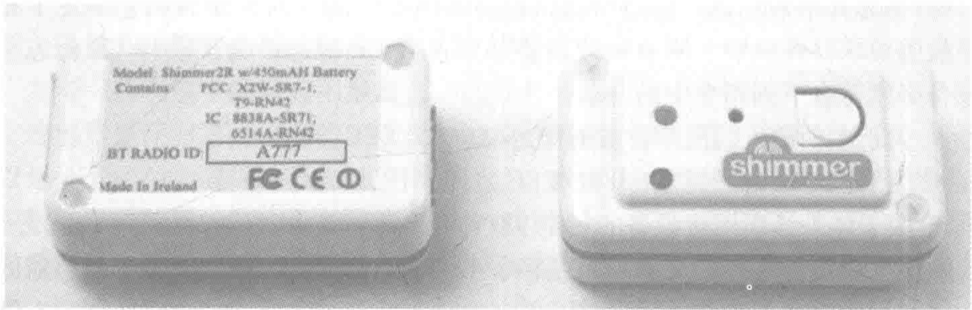


图 6-1 Shimmer 装置上的 CE 标志（获得 Realtime Technologies 公司转载许可）

获得 CE 认证是过程的一部分。一旦设备上市，生产设备的设施将接受由国家部门根据 ISO 13485 的年度审计。任何有关该设备的事件，必须呈报主管部门，然后决定采取适当的行动。欧盟监管设备终身的框架由欧洲医疗设备协会阐明，见图 6-2。

6.1.2 美国食品药品监督管理局

美国食品药品监督管理局（FDA）的设备和放射健康中心（CDRH）负责监管公司的制造、重新包装、重新标记和/或进口医疗设备在美国出售（www.fda.gov/MedicalDevices/）。它也负责管理医疗（例如，X 射线系统）和非医疗（例如，彩色电视机）发射辐射的电子产品。所有医疗设备都受到了联邦食品药品和化妆品（FD&C）法案的一般控制。这些控制，包含在第 21 联邦法规法典第 800 ~ 1200 部分（21 CFR Rarts 800 - 1200）（FD&C Act，2010），是所有的医疗设备上市后的市场营销、标识和监控的基本要求。从技术上讲，FDA 并没有“批准”医疗设备，而是“明确”医疗设备的出售。FDA 对医疗设备上市许可的过程可分为三个步骤（U.S. FDA，2013）：

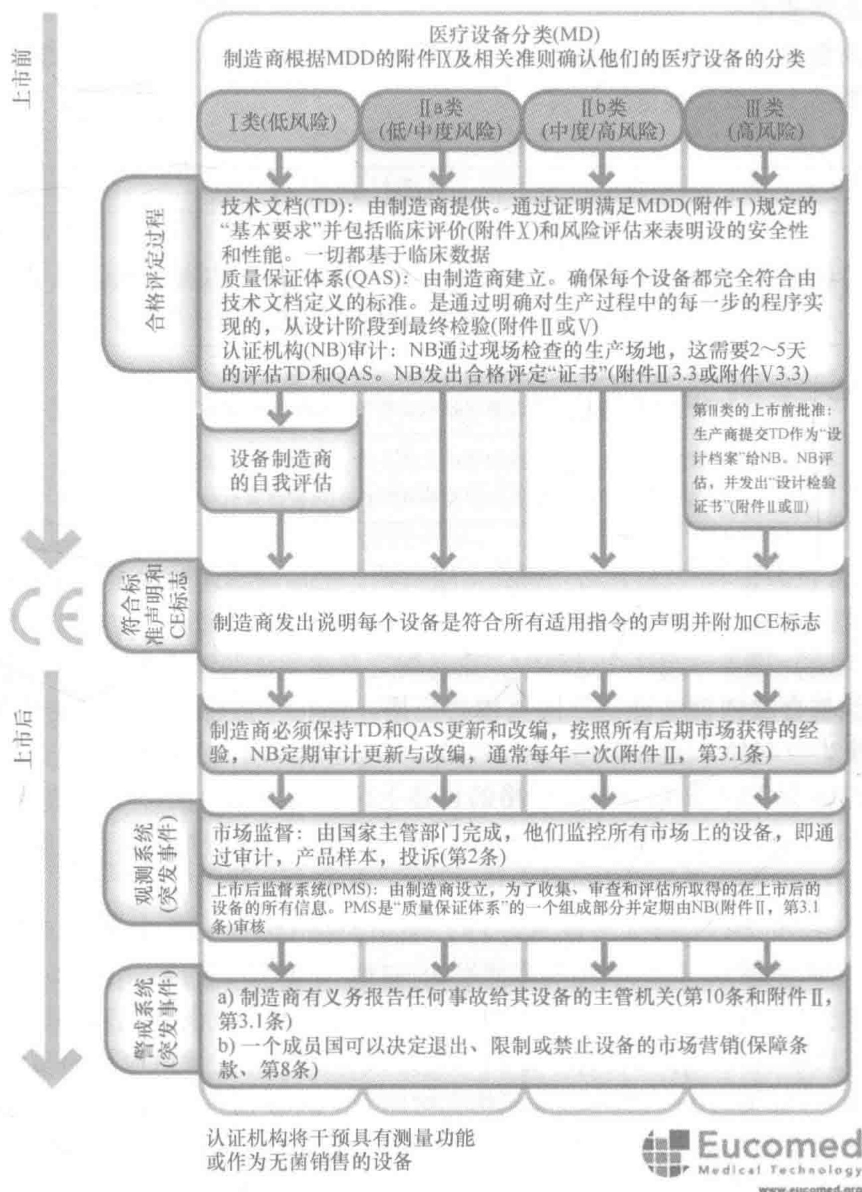


图 6-2　医疗设备欧盟监管框架（图片使用获得 Eucomed 的许可 www.eucomed.org/uploads/_key_themes/mdd/EUCOMED_infographie_03.jpg）

1）确保该产品是医疗设备，如 FD&C 法案第 201 条（h）所定义的。不符合这一定义的产品（例如，药品）会受到不同的 FDA 法规的监管。一些医疗设备（例如辐射发射器件）也需要额外的监管。

2）识别基于风险的设备分类（见表 6-1），描述见 21 CFR860。该分类将确定

所需监管的水平，以确保设备的安全性和有效性。这也将决定营销过程（上市前通知或上市前批准［PMA］）需要设备获得 FDA 批准。没有对应分类的设备则自动分类为Ⅲ类（高风险）设备，无论它带来什么样的风险。提交申请书给 FDA 要求从Ⅲ类到Ⅰ类或Ⅱ类重新分类。

表 6-1　FDA 设备分类

设备分类	描述	风险等级
Ⅰ类：一般控制	Ⅰ类设备受到最少的监管控制 Ⅰ类设备不用于支持或维持生命，或者在防止人类健康不受伤害时比较重要，同时不会有不合理生病或受伤的风险	低
Ⅱ类：特殊控制	Ⅱ类设备比Ⅰ类设备有着更高安全等级，被设计不会对患者或者用户造成伤害。Ⅱ类设备包括电动轮椅、输液泵和手术用消毒帷帘	中
Ⅲ类：上市许可	Ⅲ类器械常用来支持和维持人类生命，在预防人类健康受到损害，或者存在一个潜在的不合理生病或受伤的风险时具有巨大的重要性	高

3）开发数据和/或信息必须提交上市申请。上市前通知的过程，也被称为 510（k）申请的过程，适用于大部分Ⅱ类（中等风险）和小部分Ⅰ类（低风险）和Ⅲ类（高风险）设备。在这个过程中，设备制造商必须证明该设备是安全和有效的，通过提供与合法销售的设备等同比较的证据。510（k）程序很少需要临床试验。上市前批准（PMA）是必需的，用以评估Ⅲ类（高风险）医疗设备的安全性和有效性。PMA 是 FDA 所要求的最严格的设备上市申请类型，类似于新药审批程序。小部分 510（k）和大部分 PMA 应用要求临床试验，以获得批准上市。临床试验必须按照 FDA 的医疗设备临床试验申报（IDE）的规定执行。

FDA 在 90 天内审查大多数 501（k）申请和在 180 天内审查 PMA 申请。如果 510（k）申请完成，FDA 会给制造商发送一封电子邮件，包含指定的 510（k）的编号，说他们“已经确定您的设备等同于合法销售的参考设备”。如果 PMA 的程序完成，FDA 将审核涉及设计、开发和制造设备的所有主要供应商的质量体系规范（QSR）。如果通过，PMA 批准函将会被颁发。在收到 510（k）或 PMA 的批准函后，该设备便可以出售，同时 FDA 在其网站上完成产品列名和企业注册。FDA 将进行抽查，以确保符合质量体系规范（QSR）21 CFR Part 820。

6.1.3　其他医疗设备监管者

根据 2010 年世界卫生组织国家医疗设备基线调查（World Health Organization, 2010），145 个响应国家中只有 65% 具有国家权威机构负责实施和执行医疗设备法规。许多已经起草了法规的政府在实施上没有取得什么进展。世界卫生组织正在给予那些不具有法规制定和实施这些法规的国家支持。

65% 已经实施法规国家的医疗设备法规都有所不同。世界卫生组织是国际医疗

设备监督管理论坛的正式观察员（www.imdrf.org），并支持它的前身——全球协调工作组（GHTF）。IMDRF 是由医疗设备监管机构（包括欧盟、美国和澳大利亚）组成的自愿团体，用以“加快推进国际医疗设备监管协调和衔接。”他们最初的任务包括：

- 定义路径实施全球统一的方法来统一设备识别系统，由 GHTF 预先定义。
- 制定一套标准审计机构的审计要求，用于执行医疗设备生产企业的质量管理体系监管审计。
- 创建用于医疗设备监管目的的国际标准清单，并由 IMDRF 管理委员会成员认可。

6.2 医疗设备的标准

标准可以用于不同的目的。它们可以做的包括：

- 提供参考的标准，其中必须包含产品、工艺或服务。
- 提供一种能增强产品、工艺、服务的安全性、可靠性和性能的信息。
- 确保消费者对市场上的商品和服务的可靠性和其他特性有所了解。
- 给消费者更多的选择，允许一家公司的产品被另一家代替或结合。

标准适用于传感器设备的许多方面，包括无线电标准（已在第 3 章中讨论）、行业标准、质量标准和临床标准。本节介绍最适用于健康、保健和环境领域的标准和行业分组。

6.2.1 行业标准和认证

医疗保健行业，像许多其他行业一样，已经制定了一些标准和准则，但是没有监管。这些标准被行业领袖同意，使设备之间具有互操作性，并确保一定的质量。遵守标准是自愿的，不过兼容的设备和软件更吸引消费者，因为它们能够与其他设备协同。

1. 健康联盟（Continua）

Continua 健康联盟（www.continuaalliance.org/）是由 240 多个医疗和技术公司合作组成的，为提高个人医疗保健质量的非营利、开放性的行业组织。Continua 不是一个标准组织；相反，它识别并解决了标准机构的空白，使个人医疗保健解决方案具有互操作性，并且对改善健康管理做出贡献。该联盟创建并更新设计准则，以确保设备和制造商之间的互操作性。Continua 已经创建了一个产品认证标识（logo）计划，其采用消费者可识别的标识来标志与其他认证产品互操作性的承诺。Continua 是在个人相关医疗领域唯一的认证组织。

2. 集成医疗企业（IHE）

和 Continua 一样，IHE（www.ihe.net）是医疗保健专业人士和行业之间协同

努力的成果，以促进协调利用既定的标准，如 DICOM 和 HL7。IHE 的目标是“方便患者和授权的医疗服务提供者获得相关健康信息，以提高临床护理质量、效率和安全性。”为了实现这一目标，IHE 每年汇集医疗信息技术（HIT）的用户和开发人员，为 HIT 系统选择和优化既定标准至“IHE 配置文件”。那么供应商可以对照“Connectathon”测试他们的配置文件，以确保其符合新的配置文件。IHE 关注整个系统的互操作性，而不仅仅是其中一块（大多数标准机构的焦点）。IHE 的重点主要集中在医疗成像设备、放射学、心脏病学和 HIT 系统。

3. Happtique 健康应用程序认证计划（HACP）

Happtique 健康应用程序认证计划（www. happtique. com/app-certification/）是为了帮助医疗保健提供者和消费者易于识别医疗、健康和健身应用程序的一个自愿性计划，具体如下：

- 提供可信的内容。
- 保障用户数据。
- 说明功能。

无论是否收到联邦监管的医疗、健康或健身的应用程序都可以获得 Happtique 授予的认证印章，只要它们符合 HACP 定义的可操作性、保密性、安全性和内容标准。该标准的发展方向是由该领域的专家和有关私营机构（例如，美国医学协会）制定的。联邦机构（例如，美国 FDA、FCC）在开发过程中提供反馈意见。遵从“技术标准”（可操作性、隐私、安全性）是由第三方公司（Inertek）评估。符合“内容标准”是由医学院校协会、国际 CGFNS 和相关的临床专家评估。该 HACP 认证计划在 2013 年 2 月推出，只适用于那些用英文编写的，并在采用 iOS、Android、黑莓或 Windows 系统的设备上运行的应用程序。

6.2.2 质量管理体系标准

质量管理体系（QMS）是一种对过程和产品质量进行管理的结构化系统方法。它包括组织结构、职责、流程、程序和资源。最常见的质量管理体系是 ISO 9001，适用于所有业务部门。在许多非医疗设备行业，创造和遵守质量管理体系标准，是确保质量、促进持续的过程和产品的改进的简单方法。符合 QMS 标准的企业已被证明比不符合 QMS 标准的企业更具竞争力。在医疗设备行业，符合 QMS 标准是监管程序中的关键部分。医疗设备最常见的 QMS 是 ISO 13845 和 21 CFR 820 及相关标准。

ISO 13845 是国际标准化组织（ISO）标准，它定义了医疗设备的设计和制造的全面质量管理体系的要求。ISO 13845 一般与 ISO 9001 协调作用，规定了对质量管理体系的要求。它们的区别在于一个关键领域：ISO 9001 要求组织证明持续改进，而 ISO 13485 只要求质量体系的实施和维护。ISO 13485 与欧盟医疗设备指令紧密关联，并且证明符合 ISO 9001 和/或 ISO 13485 和 ISO 14971 通常被看作是实

现符合欧洲法规要求的第一步。ISO 13485，现在被认为是医疗设备的内联标准和要求。国际医疗设备监督管理论坛目前正在实行医疗设备单一审计计划（MDSAP），这将结合当前 ISO 13485 的修订与其成员之间实现一个协调标准。

ISO 14971 被确立为对风险管理的要求，是用以确定在产品生命周期中医疗设备安全性的 ISO 标准。本标准被更高级别的法规和其他质量标准，包括 ISO 13485 标准所要求。

美国 FDA 质量体系要求（21 CFR 820）的创建比 ISO 13485 早很多。所以，它们有所不同。美国 FDA 不承认 ISO 13485 认证，而欧盟不承认 21 CFR 820。所以，为满足美国 FDA 和国际监管机构的要求，一个完整的质量管理系统必须了解医疗设备是否在美国市场销售。欧盟和美国 FDA 的质量管理体系的审核流程之间的差异将在本章的后面进行讨论。

6.2.3　临床研究标准

临床研究试验评估临床协议、设备或药物的功效。它们是医疗设备批准过程的一个必不可少的重要组成部分。因此，它们能被安全和道德地实施，并且其结果能被准确地报告非常重要。在临床试验的过程中，相关的临床研究标准被制定用于更好地保护患者和他们的数据。最常用的标准是赫尔辛基宣言和药品临床试验管理规范。

1. 赫尔辛基宣言

赫尔辛基宣言（WMA，2013），是一套由世界医学协会（WMA）提出的伦理原则，为医学界涉及人体受试者的研究提供指导，包括研究人、可识别人体物质或数据。虽然不是具有国际法法律约束力的文书，但它被认为是在医疗保健研究的伦理学的基本文件。该原则已体现在或已经影响到国家和地区的法律和法规。该声明于 1964 年在芬兰赫尔辛基最早提出，并从此经历了六次修订和两次说明，以适应医学科学和伦理问题的进展。该宣言有 35 项条款，其中包括保障研究对象、知情同意、尽量减少风险，并秉承批准研究计划/协议的原则。

美国 FDA 拒绝了宣言 2000 年和以后的版本，并在 2006 年宣布将消除所有引用。在 2008 年 10 月，美国 FDA 采用药品临床试验管理规范替换了赫尔辛基宣言。

2. 药品临床试验管理规范（GCP）

药品临床试验管理规范（ICH，2006）是一套必须遵守的国际公认的伦理和科学质量的要求，用于涉及人类受试者参与的试验的设计、实施、记录和报告。GCP 包括如何进行临床试验的标准，定义了临床试验发起者、临床研究调查者和监测者的作用和责任。该标准保证了受试者的权利，安全和保健得到保护，也保证临床数据的可信性。由 ICH GCP 指导原则提出的统一临床数据标准被欧盟、日本和美国的监管当局所接受。该准则也可应用于涉及受试人的其他非强制性的临床试验。

6.2.4 数据互操作性标准

数据互操作的标准是必不可少的，可以更快、更安全、更低成本地提供更好的健康和健身的数据。如果没有互操作性标准，数据只能手动获得、使用非标准的设备获得，甚至无法获得数据。手动获得既是劳动密集型的，又容易出错。非标准设备必然难以运行和维护。买家为获得终端数据不得不从单一卖家处购买全部的设备，而不是购入最好的（或便宜的）单个设备实现同一目标。缺乏互操作性也会阻碍医疗护理。如果单个设备从患者身上获得的数据无法相互交流或汇集于一个集中系统，一些令人担忧的趋势或相关性可能就不会被注意到。

1. CEN ISO/IEEE 11073

CEN ISO/IEEE 11073 是国际上采用的标准族，使得医疗、保健和健康设备之间完成连接。这些标准从多方面描述连接，从物理水平（有线或无线连接）到抽象数据的表示以及与外部计算机的交换。该标准是针对个人健康和健身设备（包括脉搏血氧仪、药物分配器和活动监测仪）和医院设备（包括呼吸机和输液泵）。该标准的目标包括以下几点：

- 为医疗、保健和健康设备提供实时即插即用的互操作性。
- 在所有护理环境下，医疗点获得的护理设备数据的交换高效方便。

ISO/ IEEE 11073 个人健康设备（PHD）标准是 ISO/ IEEE 11073 系列的子类；它们解决个人医疗设备的互操作性。这些标准充分利用现有的 IEEE 11073 标准，但应用较为简单的通信模型，因为它们是专为个人使用，而不是医院。

2. 健康水平 7（HL7）

健康水平 7（www.hl7.org/）是一个非营利性的国际标准化组织，创造了互操作性的标准。HL7 指定了一些灵活的标准、指导原则和方法，使不同的计算机系统在医院和其他医疗机构互相通信。具体来说，HL7 开发了以下标准：

- 消息标准：HL7 V2.X 和 3.0 通信标准定义数据的打包和传递方式。
- 概念性标准：HL7 参考信息模型（RIM）的标准表示 HL7 的临床数据和消息的生命周期。
- 文档标准：HL7 临床文档架构（CDA）标准规定了基于 XML 的编码、结构和用于以交换为目的的临床文档的语义。
- 应用标准：HL7 临床上下文对象工作组（CCOW）标准允许临床用户使用一个用户名和密码在多个应用程序中访问数据。

6.3 环境传感器的法规

随着越来越意识到我们的健康和环境的重要，我们越来越关注于量化它们之间的相互作用。环境监测使我们能够测量我们呼吸的空气的质量、我们喝的水的质

量、任何天气变化，以及我们周围的噪声。这些参数可以使用高度校准的专用设备，或者使用现成的爱好者的设备测量。这些设备报告的参数可能严重影响我们的生活，因此，我们依靠的传感器准确、一致和及时地提醒我们关于不安全的水或更危险的一氧化碳的精确报告变得非常重要。一些标准和法规已经可以量化什么参数应测量，如何进行测量，以及这些数据如何进行报告。理解传感器的标准和能力，以满足这些标准是应用设计的关键部分。如果办公室内二氧化碳传感器不能准确地测量二氧化碳的水平，那么二氧化碳传感器的低成本没有任何意义。在许多情况下，低成本的传感器不能执行由标准所要求的规范。但有问题已经受到关注，如果多个不太准确的传感器相互弥补，共同提供尽可能多的有用信息，是否能够和一个规范仪器一样提供准确信息。若干不太准确的传感器是否可以相互补偿，作为单个调节的传感器共同提供尽可能多的有用信息。这项研究的问题还没有得到答案。但直到被回答前，最好的方法还是遵守现有的针对关键应用程序所要求的标准和法规，或者从一开始就标示出设备有局限性。

有关环境噪声、空气质量、水和天气的法规有很多条款，通常每个条款对应一个参数。描述甚至列出每一个有关这些主题的条款，超出了本节的范围。但是，本节将介绍这些主题的首要法规，以及负责监管这些环境参数的机构。

6.3.1　环境噪声

环境噪声污染是指过度的、不必要的，或者令人不安、影响人或动物生活质量的户外声音水平。不必要的噪声会引起烦躁和侵害、增加压力、影响睡眠，严重时损害听力。交通、施工、工业生产和一些娱乐活动都是户外环境噪声的常见来源。噪声污染，也可能发生在室内，但室内噪声的来源是不同的（房屋报警、音乐、家电、动物和家庭冲突）。室内噪声污染也可能受到不同的规定，这取决于该室内的使用位置（例如，职业的健康或安全）。噪声法规限制噪声的大小、持续时间和噪声的来源。允许的噪声取决于发生的时间和噪声的位置：在夜间或在很安静的地方允许的噪声水平就远低于其他地方白天的水平。

噪声计是用来测量噪声的。设备原理是通过压力的变化，声音信号经过放大滤波产生一个分贝读数。设备使用前必须在现场用校准器校准。噪声计和校准器都必须符合 ISO 标准且每年都必须在实验室校准。描述环境噪声测量的关键标准是 ISO 9613 和 ISO 1996-2。这些标准描述了如何量化各种来源的噪声。用来描述噪声最常见的措施是等效连续声级（$L_{Aeq,T}$），它根据样本周期（T）内单一的噪声水平，描述了所有噪声源的噪声波动；额定噪声水平（$L_{Ar,T}$），它让 $L_{Aeq,T}$ 增加了一点，表示更多的恼人的音调和脉冲噪声。这些水平可以在整个采样周期内连续地被测量，或者可以在一定的采样周期中，通过采集一些有代表性的样本进行测量。现代分贝仪，能够测量其他相关统计的最大值/最小值，以及 1/3 倍频程的数据，这也可以用来评估噪声。测量的信息可以在较早的 ISO 标准中找到。和很多环保措施一

样，及时采取这些措施是非常重要的。这些标准描述的是一段时间（范围从几秒到一天不等）内的平均值。间歇采集的单个污染物样本对个体对象有意义但不足以有立法价值。

在欧洲，环境噪声指令（2002/49/E，2002）是为受噪声污染地区创建的，并且在成员国层面和欧盟层面上执行。指令定义了避免、减少和防止因长期暴露在噪声环境下受到伤害的方法。该指令主要涉及的是公路、铁路、机场和城市的噪声。世界卫生组织最近发表的欧洲夜间噪声准则（WHO，2009），提出了夜间噪声对健康影响的详细信息。这些准则建议，晚上的年平均室外的噪声不得超过 40 分贝（dB）。世界卫生组织的社区噪声准则（WHO，2010）为社区情况提供了标准暴露水平（见表 6-2）。在美国，各州和地方政府负责解决噪声问题。然而，环境保护局（EPA）为保护公众健康和幸福，调查和研究噪声和其危害，向公众宣传关于噪声污染的信息，回应有关噪声的质询，并评估现行法规的有效性。

表 6-2 世界卫生组织社区噪声指导（来源：世界卫生组织社区噪声指南）

环境	危险的健康影响	噪声值/dB（A）	时间/h
户外生活领域	烦躁	50 ~ 55	16
卧室内	睡眠障碍	30	8
学校教室	沟通障碍	35	在上学期间
工业、商业和交通领域	听觉障碍	70	24
通过耳机发出的音乐	听觉障碍	85	1
仪式和娱乐	听觉障碍	100	4

6.3.2 环境空气质量

人类会受到暴露在空气中的固体颗粒、液滴或气体的不良影响。空气污染物有一个巨大的范围，它可以自然发生（氡气），或能够被人工制造（车辆排出的一氧化碳）。这些污染物来自固定污染源，比如生产设备、精炼厂和发电厂；还可能是移动污染源，比如私家车、重型货车和飞机。很多法规的存在是为了管理这些污染源。举个例子，在欧洲有油漆排放法规（油漆指令）、工业排放法规（国际植物保护公约）和沿海运输排放法规（1999/32/EC 指令），还包括其他的（EU，2013）。本书中最为相关的是欧洲清洁空气（CAFE）指令（2008/50/EC）。这个指令为空气质量污染物提供了限值（见表 6-3）和目标的测量参数值，这些限值和目标适用于不同的时间。这是因为健康的损害与每种污染物能够出现在不同的暴露时间有关。在欧盟，各个成员国都有责任在它们自己的国家实施本指令。它们必须评估全国区域的空气质量水平，起草了一个空气质量计划用于数值超出极限的情况，并且向公众宣传空气质量信息。

表 6-3 CAFE 指令限值（来源：http：//ec. europa. eu/environment/air/quality/standards. htm）

污染物	浓度	平均周期	每年允许的限值
PM2. 5	25 μg/m^3	1 年	n/a
二氧化硫（SO_2）	350 μg/m^3	1 小时	24
	125 μg/m^3	24 小时	3
二氧化氮（NO_2）	200 μg/m^3	1 小时	18
	40 μg/m^3	1 年	n/a
PM10	50 μg/m^3	24 小时	35
	40 μg/m^3	1 年	n/a
铅（Pb）	0. 5 μg/m^3	1 年	n/a
一氧化碳（CO）	10 mg/m^3	平均每天不超过 8 小时	n/a
苯	5 μg/m^3	1 年	n/a
臭氧	120μg/m^3	平均每天不超过 8 小时	3 年以上平均每年不超过 25 天
砷（As）	6ng/m^3	1 年	n/a
镉（Cd）	5ng/m^3	1 年	n/a
镍（Ni）	20ng/m^3	1 年	n/a
多环芳香烃	1ng/m^3（用苯并芘的浓度表示）	1 年	n/a

1970 年，为了使健康和环境免受空气污染的影响，清洁空气法被引入美国。该法律赋予环境保护局基于最新的科学进展来制定与修订国家环境空气质量标准（NAAQS）的权力。该清洁空气法涉及两个标准：首要标准是公共卫生的标准，次要标准是对农作物、环境和财产的保护。环境保护局当前所规定的六大标准污染物是指二氧化硫、一氧化碳、二氧化氮、臭氧、颗粒物和铅（见表 6-4）。这些污染物会损害健康、环境和财产。每种污染物被一种不同的联邦监管法规（CFR）所规定。美国的每一个州负责实施本地区内空气污染物的监管、计划和政策，但是它们不能比环境保护局所设置的法规有更弱的限制。每个州可以授予和强制实施执行许可证去管理包括排放标准和限制的污染物。

表 6-4 美国国家环境空气质量标准（来源：http：//epa. gov/air/criteria. html）

污染物	首要/次要	平均时间	等级	形式
一氧化碳（CO）	首要	8 小时	9ppm	每年只能超过标准值一次
		1 小时	35ppm	
铅（Pb）	首要和次要	平均 3 个月	0. 15μg/m^3	不能超过标准值

（续）

污染物		首要/次要	平均时间	等级	形式
二氧化氮（NO_2）		首要	1 小时	100ppb	三年以上平均不超过标准值的 98%
		首要和次要	每年	53ppb	年平均不超过标准值
臭氧（O_3）		首要和次要	每年	0.075ppm	每年度第四高日 8 小时检测值三年以上平均不超过标准值
颗粒污染物	PM2.5	首要	每年	$12\mu g/m^3$	三年以上平均的年平均值不超过标准值
		次要	每年	$15\mu g/m^3$	三年以上平均的年平均值不超过标准值
		首要和次要	24 小时	$35\mu g/m^3$	三年以上平均不超过标准值的 98%
	PM10	首要和次要	24 小时	$150\mu g/m^3$	三年以上平均只能超过一次标准值
二氧化硫（SO_2）		首要	1 小时	75ppb	每天最大 1 小时浓度三年以上平均不超过标准值的 99%
		次要	3 小时	0.5ppm	每年只能超过一次标准值

空气质量指数是用在一定规模内的单一数值来表示空气质量状况的简单方法。不同的国家通过不同的输入，用加权来产生不同的等级。欧盟空气质量指数，即普通空气质量指数（CAQI），是一个 5 级的等级，范围从 0（非常低）至大于 100（非常高）。这种等级（Elshout，2012）是基于 3 种污染物（PM_{10}、NO_2、O_3），并且被应用于提供在过去的一小时、过去的一天、过去的一年内的空气质量状况。这个等级被几个欧盟国家所应用，并允许非专业人士快速比较地区间的空气质量，而不需要理解底层数据。美国环境保护局在 5 种标准污染物的基础上实施了 6 级的 AQI（US EPA，2009）。这个数据是从整个美国收集起来的，并在实时 AirNow 空气质量网站（www.airnow.gov/）上使用不同颜色进行标示。

6.3.3 室内空气质量

室外空气质量和工业空气质量在联邦层面被很好地监管，然而针对室内空气质量的监管比较少。我们在室内、睡觉、工作、旅游或从事室内体育和休闲活动上花费的时间之多令人惊讶。室内空气质量（IAQ）是用来描述那些已知或被怀疑会影

响人们的舒适、健康或工作学习中的表现的空气污染物的浓度。在严重的情况下，质量差的室内空气可以通过空气传播疾病，如军团病；引发癌症，如由于氡辐射引起的肺癌；或由于严重急性呼吸道症候群（SARS）或一氧化碳（CO）中毒导致的死亡。空气污染有几种来源，同时具有与之相应的标准和法规。

大多数室内空气污染物来自局部化学源，如清洁产品、空气清新剂和农药；或建筑材料、供暖和烹饪的排放。这些污染物的影响可通过足够的通风来克服。通风正日益成为西方国家的问题。当我们努力实现密闭节能住宅和工作场所，我们忽略自然或机械气流进出建筑物的重要性。全球变暖也可以发挥一部分的作用；极端天气迫使我们关闭所有窗户和自然通风的来源，从而导致化学物质、病原体和变应原（又称过敏原）的积聚。良好的建筑和通风设计是确保 IAQ 的重要因素。美国采暖、制冷和空调工程师学会（ASHRAE）发布了被公认的一系列有关 HVAC 系统和问题的标准及准则，如 ASHRAE 62－2001 标准，“可接受的室内空气质量的通风”（ANSI/ASHRAE）的标准和准则。这些标准被广泛应用于工业，但不具有法律约束力。然而，环境保护局已经采取了规定中的一些建议。不良的热条件和通气不足可以促使微生物在建筑物表面的增长及空气传播的病原体和尘螨的生存。空气污染的室外来源也可以影响室内空气质量。

从感测的角度来看，ISO/TC 146 空气质量技术委员会（ISO/TC 146，2013）负责用于检测排放物、工作区的空气、环境空气和室内空气的空气质量特性以及气象参数的工具的标准化。它描述了空气污染物（颗粒、气体、异味和微生物）的测量方法、测量规划、质量保证/质量控制（QA/QC）的程序和不确定度的结果的评估方法。这个技术委员会负责在 IAQ 传感领域中的共 140 个 ISO 标准。世界卫生组织室内空气质量污染物确定小组（WHO，2010）对一些通常存在于室内空气中的化学物质提供了以科学为基础的准则。该指南所描述的室内常见对身体有害的化学品是苯、一氧化碳、甲醛、萘、二氧化氮、多环芳烃、氡、三氯乙烯和四氯乙烯，同时该指南还科学地介绍了每一种化学品所带来的风险。随着室外空气质量的规定，每一种化学品的暴露限制是根据平均暴露时间进行说明的。

从消费者的角度来看，最常检测到的化学物质，是一氧化碳和氡。一氧化碳（CO）是供暖、烹饪和燃烧发动机的副产物，因此通常在室内和室外的中低层中出现。通风不畅或损坏的电器可能会导致此无色、无味的气体积累致死。因此，建议所有的家庭安装和维护一个 CO 警报器。在欧洲，家庭 CO 传感器必须符合欧洲标准 EN 50291，其中规定，报警能够在以下级别触发：

- 达到 30ppm 的浓度超过 120min。
- 达到 50ppm 的浓度 60～90min。
- 达到 100ppm 的浓度 10～40min。
- 达到 300ppm 的浓度不到 3min。

这些标准比美国标准（Underwriters Laboratories，2005）对于 CO 更为安全。

应当指出的是，CO 警报器被设计出来的目的是防止急性中毒（一次性意外中毒）。它们不是被设计成防止慢性中毒（多次低级中毒），这也带来了健康风险。

氡是一种天然存在的由于岩石和土壤中的铀的衰减而产生的放射性气体。如CO，它无色、无臭、无味，仅能使用特殊的设备进行测量。它是导致非吸烟者得肺癌的主要危险因素。在露天，氡被迅速稀释到无害的浓度。然而，在封闭的空间，如房子，氡可以达到危险浓度的水平。国家辐射监测机构映射高氡风险的位置。建筑法规规定，缓解方法应该用于保护建筑物在施工阶段不受氡的影响。这些措施包括全密封、低渗透膜或氡坑。然而，这些膜可能会被损坏，并且氡仍可能泄漏到建筑物。氡传感器可以从国家辐射监测机构用较低的费用购买。这些传感器在测氡的浓度的三个月周期内确保催化剂的浓度。氡气含量被监管机构根据行动标准和参考标准来描述。正如其名称所示的，一个行动标准是指采取哪些行动可以减轻对氡的接触，作为警报水平的参考。世界卫生组织（WHO，2010）推荐的可接受的在住宅中氡气浓度的最大年平均水平是 $100Bq/m^3$。欧洲国家（EU，2009）的参考水平在 $200 \sim 400Bq/m^3$之间；美国环境保护局建议在 $74Bq/m^3$的水平（US EPA，2013）。

6.3.4 饮用水

饮用水是维持生命所必需的，且可以充足、安全获得。然而，饮用水可能含有微生物、化学或放射性等不安全的成分。饮用水标准是由国家和地区定义和实施的。世界卫生组织发表了应达到的最低标准准则（WHO，2011），适用于现在没有标准的国家。世界卫生组织的准则包含化学和微生物污染的指导准则，以及如何应用这些准则。然而，这些标准不是法律强制执行的。在欧洲，饮用水是由欧洲饮用水指令（98/83/EC）监管。在美国，环境保护局按照安全饮用水法规（42 U. S. C. 300f）监管饮用水。欧盟和美国的法规都具有法律效力。这些标准和规范以浓度（30mg/L 的铁）或受微生物污染的人口数来描述物质的参数。每个参数的最大值是根据监管对象确定的。例如，氰化物的最大污染物水平（MCL），在欧盟为 0. 05mg/L，但在美国为 0. 2mg/L（SWDF）。饮用水标准和法规不仅描述 MCL，还有样本采集的背景（采样位置、采样方法和采样频率）和样本的解释（分析方法和实验室鉴定）。如果一个人想用传感器设备亲自监测水质，那么采样的背景是非常重要的。同样重要的是要知道污染物在什么参数范围内对人体的健康不会造成影响。

6.3.5 射频频谱的监管和分配

射频频谱是用于描述用于无线电频率的那部分电磁频谱（即完整的从 3kHz ~ 300GHz 的频率范围）的术语。射频频谱被广泛应用，包括政府通信（国防、公共安全、交通运输）、公共商业服务（语音、数据、电视和无线电广播）、以及工业、

科学和医疗的使用（无绳电话、婴儿监视器、无线网络）。这种广泛的应用，需要精细的监管，以确保频谱起到最大的作用。尽管与区域和全球机构保持一致，射频频谱管理是由每一个国家的政府所负责的。射频频谱被分成不同且不重叠的频率范围，称为频带，用于防止干扰，并允许高效地利用射频频谱。类似的服务按照它们的频率（例如，特高频［VHF］）或它们的应用（例如，海运）在相同的频段分组，并且这些频带有着相应的描述。每个频带具有一组基本的使用规则，以确保接收器和发射器之间的兼容性，并避免不同源之间的干扰。

射频频谱是一种有价值的商品，它通常是由一个国家的政府拥有。政府指定的监管机构可以授权部分频谱的使用权，通过授权特定地区内的广播、电视和移动电话公司可以排他使用。被授权的商家可以在分配的波段内广播他们的业务。而没有被授权的广播被称为无证广播，是违反法律的。幸运的是，也已经有分配给个人使用，用于本地通信的频谱的频带。最常见的这些频带位于 900MHz 和 2.4GHz，被称为工业、科学和医疗（ISM）频带。ISM 频带最初是为由 ISM 设备产生的电磁辐射保留的。然而，近几年这些频带也开始被使用于免授权、容错、通信应用，比如无绳电话、蓝牙装置、近场通信（NFC）设备和无线计算机网络。在此频带运行的低功耗通信设备会受到来自此频带的其他授权用户的干扰，并且不能对授权用户造成干扰。

未经授权的 ISM 无线电设备并不意味着它们是不受管制的，该设备本身必须满足严格的法规和有关监管部门的认证。美国联邦通信委员会（FCC）是负责确保低功耗通信设备符合美国联邦法规第 15 部分的第 47 条（47 CFR Part15）。本法规适用于大多数电子设备，因为它描述了在有意的、无意的或附带散热器的情况下，可以不需要个人许可证的规定。47 CFR 第 15 部分规定，大部分电子设备必须验证或认证不会产生有害辐射。验证过程通常用于接收器和无意的发射器，并涉及建立一个符合 FCC 第 15 部分的标准的声明。认证测试实验室必须测试样本设备，并且生成测试报告和制造商一致性声明提交给 FFC。所有有意的发射器必须获得 FCC 认证。为了获得认证，认证测试实验室必须要求 FCC 授权代码，测试设备，并提交详细的测试报告给 FCC。如果 FCC 认为该设备满足各项法规，这将证明该设备合格并发出该设备的 FCC 的标识号。供应商必须给每个售卖的设备附上 FCC 标识号和 FCC 标志。

在欧洲，ISM 频带的设备被称为短距离设备（SRD）。这些设备是低功率的无线设备，其干扰其他无线电设备的能力低。在欧洲，有两个独立的机构定义了管理低功率无线设备的法规：

- 欧洲邮政和电信管理局会议（CEPT）定义了短距离无线设备（SRD）频率、分配和使用，详见文件 ERC/REC 70－03（CEPT，2013）。
- 欧洲电信标准化协会（ETSI）定义了 SRD 无线设备进入欧盟市场所要求的程序，详见无线电和电信终端设备指令（1999/5/EC）。

欧洲实现广播合规的过程类似FCC的过程。接收器只需要创建符合性声明，并建立技术文件来支持它们的应用程序；而发射器必须经过无线电测试，以符合统一标准。如果统一标准不适用，无线电设备也必须由认证机构进行评估。许多统一的标准可以适用于任何给定的无线电。因此，最好是开发和申请认证时，寻求有资格的实验室的建议。

FCC和欧盟机构也执行其他一些重要的非强制性功能，这是本章范围之外的内容。这些措施包括推进引进新的无线技术，合理化和优化使用射频频谱，为了公民的利益与其他政府机构合作等。以FCC为例，于2011年形成了移动健康（移动医疗）工作组，负责调查FCC能够促进移动医疗技术运用的方法，以改善健康状况，并降低医疗成本。作为频谱调节器，它能够为一类新的设备确定和分配频谱，被称为医疗体域网（MBAN）；调查和计划改善农村宽带医疗网络；并提供移动医疗法规的投入。

6.4 挑战

在标准和监管方面有许多挑战，最紧迫的是手机应用限制的规定。制定标准和法规是一个缓慢的过程，需要多方的共识。由于缺乏国际监管的共识加剧了移动医疗监管达成一致的难度。再次，人们普遍认为国际标准的医疗设备监管将有利于设备制造商和消费者，但为实现这一目标的进展一直很缓慢。对于数据隐私和数据共享的国际准则的缺乏可能对个性化健康解决方案的发展有着很大的影响。调查并制定个性化的健康解决方案需要大量的数据；对于特别罕见的疾病，就可能无法收集由单个监管机构所控制的地区的显著数据集。最后，公民科学家从他们自己的实验中生成、存储和报告数据，是一个令人兴奋的发展前景。然而，如果人们相信非严格的实验中的低质量传感器是有风险的，随着低成本的传感器变得更容易获得，对这种数据需要有宽松管理和免责声明。

6.4.1 针对具体国家的监管程序

安全、质量、性能、公平准入以及医疗设备的性价比是所有设备监管机构的共同目标。然而各种监管机构和不同的监管要求（见表6-5）会阻碍这些目标。

表6-5 可选择的国际医疗设备监管机构

地理位置	监管机构
澳大利亚	药物管理局（TGA）
巴西	国家卫生监督管理局（ANVISA）
加拿大	加拿大卫生部
中国	中国国家食品药品监督管理局（SFDA）

（续）

地理位置	监管机构
印度	中央药品标准控制组织（CDSCO）
日本	药品和医疗设备管理局（PMDA）
俄罗斯	俄罗斯卫生监督局

美国FDA和欧盟医疗设备法规之间缺乏兼容性，这方面最明显的例子就是在下面三个显著的方面（COCIR/MITA，2013）：

- 医疗技术制造商审计质量管理体系：欧盟合格评定机构和美国FDA相互不接受对方的QMS审核报告。其结果是，制造商必须通过两个机构进行审核，尽管两者要求非常类似。这两个部门都是IMDRF的成员，可以通过实施一个共同的审核程序或单独的质量体系解决此问题。
- 市场应用格式：虽然数据集都被双方主管部门受理，但提交方法和应用格式却有很大的不同。这将进一步对制造商增加监管负担。这可以通过采用由GHTD决定的统一的上市前提交格式来解决。
- 医疗设备身份证：UDI数据库的发展是追求可追溯性和互操作性的国际目标。然而，欧洲还没有开始实施UDI或常见的标签要求，而FDA正在开发一个数据库。

由世界卫生组织监督的IMDRF的成员们，正在合作打造协调和融合的监管。然而，尽管协调谈判多年，对最好的监管模式的争论仍在继续。美国FDA提出集中式模型负责医疗设备的上市前和上市后所有方面的监管。欧盟提出分散模式，其方法是由国家“认证机构”审查新的医疗设备的安全性和性能。集中模式的批评者（www. dontlosethe3. eu）抱怨说，集中模式非常慢而且官僚化，延误患者使用设备3～5年（见图6-3）。主张集中模式的人援引PIP乳房假体植入事件为分散模式失败的例子。研究（BCG 2011）已经证明，这两种系统都同样安全。IMDRF的成员将继续协调医疗设备监管的各个方面。集中与分散模式的辩论还有待观察。

6.4.2 移动健康应用程序

移动医疗应用程序（mHealth apps）是一个快速增长的市场，有超过38000个应用程序归类为医疗保健和健身应用程序，2013年iOS应用商店中归类于医疗的有24000个应用程序。在这个时代，已经有越来越多的医生通过应用程序开处方，但不寻常的是移动医疗应用市场在很大程度上仍然不受管制。虽然大多数应用程序都是健康和健身监测应用程序，但也有数量不多但快速增长的应用程序声称可以诊断或识别疾病。未经认证的应用程序的开发者，最近被美国联邦贸易委员会罚款，但主动的监管方法是迫切需要的。

2012年，在没有明确的适用于目前移动医疗的监管指引的情况下，一家私营

患者在欧盟和美国获得的医疗技术

	欧盟批准（已获得CE认证）	美国FDA认证	
Spectra Optia Terumo BCT 在美国以外，该仪器已完成超过20000次对镰状细胞病的患者单核收集程序	2010年6月	2012年7月	延迟24个月
Revo MRI SureScan Medtronic 第一个可以安全接收核磁共振扫描的起搏器，这种技术通过降低患者对未来的诊断需要来提高生活质量	2008年9月	2011年2月	延迟29个月
Esteem Implantable Hearing System Envoy medical 第一个可治疗重度听力受损的植入式听力系统，对那些有中至重度的感官神经听觉受损的且无法忍受现有医疗条件下的耳膜患者而言是非常必要的医疗手段	2006年5月	2010年3月	延迟46个月
Sapien Transcatheter Aortic Valve Edwards LifeSciences 为受严重损害的患者提供替代开放式心脏手术的方案	2007年9月	2011年10月	延迟49个月
Symplicity Renal Denervation System Medtronic 用于难治性高血压的高性价比治疗策略，该系统的两个部件提供所需的能量，可安全、优秀和持续地降低那些即使使用多个药方也无法达到正常血压水平的患者的血压	2010年4月	仍未决定	延迟29个月以上
The CoreValve System Medtronic 被植入超过26000人，分布于除美国外的50个国家，并且是唯一获准直接从主动脉或锁骨进入的经导管主动脉瓣植入系统	2007年5月	仍未决定	延迟60个月以上

图 6-3　患者在欧盟和美国获得的医疗技术（获得 Eucomed www.eucomed.org/uploads/images/_key_themes/mdd/visuals/patient_access.jpg 的转载许可）

公司 Happtique，制定了对移动医疗的应用程序的认证体系（HACP，2012）。该 HACP，如本章前面所述，使用独立的第三方评估的内容、隐私、性能和可操作性方面的遵守准则。

移动医疗应用程序的监管是一项复杂的任务。新规定必须允许快速创新，同时确保安全性，必须考虑端到端的应用程序，而不只是一个设备或模块。在美国，FDA 发布 2013 年移动医疗应用程序指南（U. S. Food and Drug Administration，2013）。在此指南中，移动医疗应用程序的定义如下：

移动应用程序需要符合联邦食品、药品和化妆品法案（FD&C 法案）第 201（h）对“设备”的定义；并且被视作受监管的医疗设备的一个附件；或定义为一个受监管的医疗设备的移动平台。判断移动应用程序的预期功能来确定它是否符合“设备”的定义。

根据这些准则，FDA 将重点监管移动医疗的应用程序，即如果应用程序没有按照预期工作，患者将面临更大的风险。因此，大多数移动医疗应用程序是低风险的应用程序，不会受到监管。美国 FCC 已经成立了一个移动医疗的特别工作组来评估移动医疗对通信行业的影响。2010 年，美国 FDA 和 FCC 签署了一份谅解备忘录，这体现了移动医疗跨学科的性质。

6.4.3　个性化医疗

个性化医疗的出现将对法规和标准制定机构有着显著影响。个性化医疗有望把医疗保健从“一刀切”的医疗方式转变为“在正确的时间给正确的人以正确的干预”的医疗方式。然而，为了实现这个目标，患者必须根据各自的生理结构、生活方式和环境因素被精细分组。通过将患者分组，干预措施可以被那些最有效的单个组识别。必须了解每个人独特的遗传倾向、生活方式和环境因素，而且必须创建和维护大量人口的集成数据配置文件。随着疾病被分类成越来越小的子类型，跨界共享数据将是必要的，使得各研究组获得足够多的数据。跨界共享将给监管机构带来一些挑战。数据获取、数据保护、数据的利用和再利用以及数据生命周期必须得到一个一致、国际性、规范的解决方法，为此还需要满足公民权利与公共利益的平衡。

数据读写能力将变得越来越重要。患者必须了解提供给他们的选择，使他们可以为自己的健康做出明智的决定。数据隐私法也不得不从“数据保护”变为“可控制的数据共享”。商业利用遗传/基因组数据必须密切监测和监管，以防止患者之间的歧视。从传感的角度来看，电子健康档案将不得不修改为允许从个人的健康和健身设备上进行终生的数据采集，以及传统的医疗记录。个人健康和健身设备数据的背景和质量将需要仔细考虑，如果它要与临床数据相关联。

6.4.4　大众科学

便捷地接入健康、健身和环境传感器和聚合平台使得一代公民科学家能够获得、解释和传播数据。众包数据在一定程度上可以提供更昂贵的监管设备不能提供的地理间隔尺寸。Asthmapolis 的移动健康应用程序（http：//asthmapolis.com）是一个很好的众包数据的例子。这个程序与哮喘吸入器同步，并标记每一个使用吸入器的位置。这些数据可以与更广泛的群体分享用于鉴别哮喘吸入器使用较多的哮喘“热点”。同样，空气质量蛋（http：//airqualityegg.com/）这个应用程序允许任何人收集户外 NO_2 和 CO 浓度，并与更广泛的群体分享该数据。这只是两个物联网应

用程序对公共知识和健康有贡献的例子。

然而，对于公民科学家获得数据也是有限制的：设备传感器的分辨率可能比不上受监管的设备。高度准确的天气和污染站点也可能给出误导性的数据，如果它们被放置在阴凉处或太靠近马路。不考虑背景，而相信民众采用高精度已校准设备的数据可能会引起不必要的恐慌，而在拥挤的地方可能会产生严重的影响，比如在地铁站。法规适用于确保安全使用的装置，但是否应该有关于数据的安全使用和解释的指导？数据是否应该根据一个爱好者的标准进行审核过滤？假定无效数据为一个更大分组的数据源的异常值是否安全？研究方法和存在标准的培训是否能确保更精确的数据？数据使用者是否愿意接受使用未受监管数据源的数据的风险？

在下一章中，我们将检验会创造机会和障碍的广泛传播基于用户的生物传感技术的社会关系。公民领导的科学正在驱动传感器技术从“应该做什么”到“能做什么”的转变。这些新技术有利于对身体和所在环境新的认识，驱动个人数据共享的各种新方法和实践。鉴于此，公民科学将会是欧盟地平线 2020（Horizon 2020）研究计划中受关注的焦点。

6.5 小结

本章介绍了基于传感器的医疗、健康和环境检测领域的标准和法规，以美国 FDA 和欧盟 MDD 为例，描述了复杂的医疗设备监管的程序。关于标准的内容，以典型例子，本章介绍了所关注领域中传感器应用的最常用的标准。本章还介绍了管理环境检测传感器和射频频谱的法规和标准制定机构。最后，在科学、技术和用户需求快速发展的时代下，对法规和标准制定机构面临的挑战进行了讨论。

参考文献

European Standards, "Council Directive 93/42/EEC of 14 June 1993 concerning medical devices," 1993.

European Commission Enterprise and Industry. "*CE marking for professionals: 6 steps for manufacturers*", Last Update: November 2013, http://ec.europa.eu/enterprise/policies/single-market-goods/cemarking/professionals/manufacturers/directives/index_en.htm

Underwriters Laboratories, "Single and Multiple Station Carbon Monoxide Alarms," vol. UL 2034, ed 2, 2005.

United States, "Federal Food Drug & Cosmetic (FD&C) Act," in *Title 21 Code of Federal Regulations Part 800-1200*, 2010.

U.S. Food and Drug Administration. "*Medical Devices: How to Market Your Device*", Last Update: November 2013, http://www.fda.gov/medicaldevices/deviceregulationandguidance/howtomarketyourdevice/default.htm

World Health Organization, "Baseline country survey on medical devices", http://whqlibdoc.who.int/hq/2011/WHO_HSS_EHT_DIM_11.01_eng.pdf, 2010.

World Medical Association. "*Declaration of Helsinki*", Last Update: November 2013, http://www.wma.net/en/30publications/10policies/b3/

International Conference on Harmonisation of Technical Requirements for Registration of Pharmaceuticals for Human Use (ICH), "ICH Harmonised Tripartite Guideline. Guideline for Good Clinical Practice E6(R1)," 1996.

European Standards, "Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise," 2002.

World Health Organization, "Night Noise Guidelines for Europe", 2009.

World Health Organization, "WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants", 2010.
European Commission. "*Air Quality Legislation*", Last Update: November 2013, http://ec.europa.eu/environment/air/legis.htm
European Standards, "Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe," 2008.
Elshout, Sef van den, Hans Bartelds, Hermann Heich, and Karine Léger, "CAQI Air quality index. Comparing Urban Air Quality across Borders", http://www.airqualitynow.eu/download/CITEAIR-Comparing_Urban_Air_Quality_across_Borders.pdf, 2012.
U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Outreach and Information Division, "A Guide to Air Quality and Your Health," 2009.
American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, "Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality," vol. ANSI/ASHRAE 62-2001, 2003.
ISO/TC 146 Air quality Technical Committee. Last Update: November 2013, http://www.iso.org/iso/home/standards_development/list_of_iso_technical_committees/iso_technical_committee.htm?commid=52702
European Environment and Health Information System, "Radon Levels in Dwellings: Fact Sheet 4.6," in http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/97053/4.6_-RPG4_Rad_Ex1-ed2010_editedViv_layouted.pdf, ed, 2009.
United States Environmental Protection Agency, "Basic Radon Facts," in http://www.epa.gov/radon/pdfs/basic_radon_facts.pdf vol. EPA 402/F-12/005, 2013.
World Health Organization, "Guidelines for drinking-water quality - 4th ed.", http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2011/dwq_chapters/en/index.html, 2011.
European Standards, "Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption," vol. 98/83/EC, 1998.
"Safe Drinking Water Act," in *Title 42 - The Public Health and Welfare. Chapter 6a - Public Health Service. Subchapter XII - Safety of Public Water Systems* vol. 42 U.S.C. 300f, 1996.
Safe Drinking Water Foundation. "*Comparison Chart of Drinking Water Standards from around the World*", Last Update: November 2013, http://www.safewater.org/PDFS/resourceswaterqualityinfo/RegulationsGuidelinesComparisons.pdf
Code of Federal Regulations, "Title 47-Telecommunication Chapter I--Federal Communications Commisions Subchapter A--General Part 15--Radio Frequency Devices," vol. Title 47 CFR Part 15.
European Conference of Postal and Telecommunication Administration, "ERC Recommendation 70-03 (Tromsø 1997 and subsequent amendments) relating to the use of Short Range Devices (SRD)," in *ERC/REC 70-03*, 2013.
European Standards, "Directive 1999/5/EC of the European Parliment and of the Council of 9 March 1999 on radio equipment and telecommunications terminal equipment and the mutual recognition of their conformity," vol. 1999/5/EC, 1999.
COCIR/MITA Joint Contribution, "EU and US call for input on regulatory issues for possible future trade agreement," 2013.
Boston Consulting Group, "EU Medical Device Approval Safety Assessment. A comparative analysis of medical device recalls 2005-2009", 2011.
U.S. Food and Drug Administration, "Guidance for Industry and Food and Drug Administration Staff - Mobile Medical Applications," 2013.
European Union. "*Horizon 2020 Funding Programme*", Last Update: November 2013, http://ec.europa.eu/research/horizon2020/index_en.cfm

第 7 章　生物传感器的数据经济

Dawn Nafus，Intel 实验室资深研究员

生物传感不是空想产生的，它总是诞生于某种形式的社会背景，而这些背景对于限定生物传感器的适用范围有着深远的影响。然而，社会背景并不是像第一眼看上去那样显而易见，其中涉及很多由特定情境决定的设计依据。例如，一个为专业人员设计用于监护老人慢性阻塞性肺病（COPD）的设备，可能与用于追踪运动员活动量的监护仪，或者某民间科学组织用于评测当地空气质量的仪器大相径庭。在完全私有化的医疗系统中运转良好的设备可能在个人支付系统中无立足之地。甚至同样在个人支付系统中，在荷兰有效而在英国却不一定有效。不仅仅是终端用户人群，所有涉及的其他角色造成的不同之处都值得注意和考究。我们呈现数据给专业人员的方式必然与给流行病学家和民间社会团体的方式不同。

但并不是每一项设计依据都在这些特定的交互背景中有所体现。正在发生的较大规模的社会变革改变了人们在日常生活中使用生物传感的方式。本章讨论了那些与解读数据和数据分送的对象有关的问题。提供这些反思是出于一个有助于相关学术研究的人类学者和以解读学术并精炼成具体设计和战略决定为己任的信息通信技术（ICT）领域从业人员的角度。尽管在这样一部技术书中可能有些不同寻常，但人类学者现在已经频繁地致力于科技产业的研究并且定期地通报关于技术设计和市场策略的决定（详细资料参见 Cefkin，2010）。鉴于我的人类学背景，本章的行文会与其他章节有所差异，主旨同样也会有所不同。关于各种各样传感器的材料功能可见性以及基于这些功能可见性的潜在用途就交给其他章节介绍，此处不再赘述。我将重点置于相关的社会科学以讨论那些使某些用途较其他更有价值的社会安排。我不能详细阐述所有与生物传感相关的社会环境，但会提炼出一些它们的共同点。

关于工业和工程研究如何倾向于向生物传感发展存在着一定的模式，而且这些模式有着社会和技术上的起源。之所以一些使用惯例看上去像是最合理的，是由于社会历史将传感技术与工业使用紧密联系在了一起。这些最显而易见的用法最终却并不一定对终端用户是最有价值的，认识到这个现实是看透问题的首要条件，而我对达到这第一个目标充满信心。事实上，这样做也不无道理。本章会列举一些具体的例子，这些例子中呈现的生物传感器的应用在最初看上去十分合理可信，最终却使生物传感器沦为敝帚而被停止使用，同时也造成了令人不安的社会效应。一旦我们可以确定当今生物传感器概念化过程中的共同点，我们就可以开发出更多的途径。本章还包含了一些关于新使用模型和新应用的说明，但这些其实是为了指出一

个更广阔的潜在发展方向。

本章所述及的生物传感技术不仅包括检测体内或体表物质的传感器，也包括那些检测周围环境中对身体有影响物质的传感器。生物传感器本身已经是其所在的更大的数据经济中的一部分。“数据经济”一词在此表示数据在设备、人和机构中的数据流通。不论设备、使用实例、用户人群或是机构，数据只有在频繁流动中才能体现出其价值。一旦数据无处可去，它也就完全失去了价值并被弃而不用。如果数据拥有了可扩展性，无论是在不同人群之间往复的过程中形成的，还是作为一个数据流为同一个人的另一个数据流提供前后环境而产生的，都可以说它拥有了一组拓展的社会和文化意义，如同拥有了五光十色的人生。因为数据的不断流动，它也就拥有了不同的价值（Neff and Fiore - Silfvast，2013）。换言之，我们将不再就“步行 5000 步”代表什么和这样的测量结果需要什么样的行动呼应而达成共识。对某些人来说，这可能是健康状况良好的指标，但对另一些人这可能表示着医学上毫无用处。对于一些人这意味着需要步行更多，但对另一些人则意味着只需要持续一周的低运动量。我们使用“步”这个词归根结底是受了先前舆论传播的影响；例如早期的产品演示常把“步”作为健身量的指示计，在不断的使用中，“步”逐渐被采用、理解并接受。

无论从观点的不同还是度量标准出现的方式中我们都可以发现，当数据参与到交易或流通时，它的价值就得以体现[⊖]。交易的具体形式，是像市场还是以开源代码、礼物经济或是其他的形式，是由特定的情境决定的。实际上，当数据在一个被照顾的人和其家庭成员之间传播时，数据经济就与市场截然不同了。但是无论如何这也是一种流通，生物传感器数据深刻的社会性其中就包括了流通的因素。Kenner 提供了一种对于不同移动哮喘监护技术数据经济的分类方法（见表 7-1）。这些例子清晰地证明了当参与者变化时，数据的社会影响也会随之改变。

表 7-1 移动哮喘监护技术的数据经济

	种类	实例	经济参与者	社会关系与数据流向
第一类	单向信息传递	Asthma Signal	患者 医生 应用程序开发人员 环境数据提供商	根据行动计划，患者会接收到服药的提醒 医生为患者提供关于身体状况的信息 患者从应用程序开发人员处获取健康信息
第二类	兼容护理	My Asthma Asthma Check Asthma Tracker	患者 哮喘护理国家标准制定者 应用程序开发人员	患者接收到基于行动计划的提醒 患者进入症状观察 关于获取观察结果的人员信息知之甚少

⊖ 人类学家会看到我从 Tarde（Latour 和 Lépinay，2009）提取的循环和交换的假设，而非新古典主义的经济学。

（续）

	种类	实例	经济参与者	社会关系与数据流向
第三类	环境卫生	AsthmaSense AsthmaWin	患者 哮喘护理国家标准制定者 应用程序开发人员 环境数据提供商	患者记录症状观察 患者接收到环境数据 健康与环境数据的结合使得患者理解触发源的意义成为可能
第四类	参与性流行病学	AsthmaMD PropellerHealth （之前被称为 Asthmapolis） Breathe Easy	患者 应用程序开发者 第三方数据收集器	患者记录症状观察 患者产生关于症状发生位置的定位信息 患者选择第三方数据收集器对哮喘触发源进行研究

帮助哮喘患者是每个系统设计的共同初衷，采用的方法却是各不相同。第一类应用程序将数据交换视为当前医疗系统的延伸，数据只是单向地从系统中传出至患者端，患者则由专家进行管理。在第二类应用程序中，患者有机会记录观察到的关于症状的结果。值得注意的是，这种记录绝大多数是由用户手动输入的，但我们可以想象，在将来这一现象可能会被更有效的生物传感器所颠覆。关于这些信息的去向，是患者自身消费还是便于医学从业者查看，目前还没有明确。在我对量化自我这一活动参与者的调查中发现，很少有医生有意识和耐心去看患者自己记录的数据，因为阅读此种记录需要医生自己去分析其中哪些是与医学相关的，而这与自我护理中的相关程度是不同的。在一个忙碌的诊所中，这种分析也是很难发生的（Neff and Fiore - Silfvast，2013）。将医疗系统与患者联系在一起，让患者有机会与医学专家进行交流，这样的初衷是有意义的，但不一定能成功。在第三类应用程序中，环境数据的加入带来了新的数据提供方，并且为患者了解自己的身体状况提供了可能，而不是仅仅被提醒什么时候服药。第四类应用程序中的数据流通较前几种又有所不同，患者本身既是数据的消费者，也是生产者，这使得对于流行病学的研究也变为可能。由于这些应用程序上市不久，现在还无法确定实际使用中各个角色之间的权力关系，但是数据的流动是为了创造患者与流行病学研究的关系，而非为了临床护理。

成本下降使得生物传感技术的使用不再限于医疗机构中。由于它已经普遍地可以被接近和使用，生物传感器数据流通中的交换变得更加的多样性。图 7-1 是一个通用的电子计步器。图中的数据交换链表明了谁有权获得什么数据，谁最终从数据中获益；而这与先前的移动哮喘监护设备是完全不同的。首先值得注意的是，其中

出现的社交媒体公司不是传统医疗领域的一员，也不会受到卫生监管机构监控。其次是由谁或者什么来解读这些数据的分布式特性。数据并不是直接发送给专家以对数据的有效性进行判别，数据泄露的受益人也不一定拥有相同的目标和动机。他们的收益不是源于建立行业之间或行业与患者之间的联系，而源于分析大量复杂的数据集并建立相关性，尽管这些数据集可能和健康毫无关系。

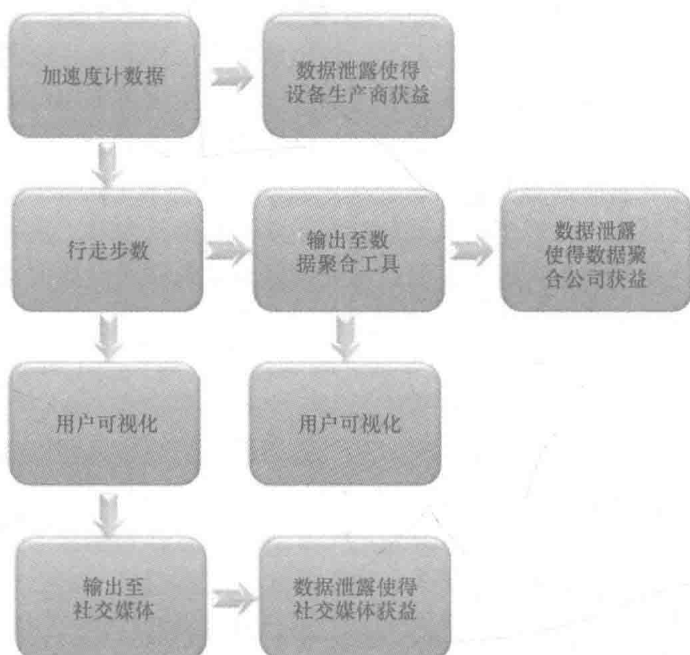


图 7-1 一个简单的电子计步器的数据经济例子

换个角度来考量传感器数据，转而追踪它在不同作用物之间的运动，不禁使我们疑惑数据是如何向周围移动的：什么样的社会活动在这些箭头中起决定作用？这些涉及的角色是否平等或者这样的关系是不是由权力关系塑造成型的？在此，我借鉴了一种在社会科学中长期存在的方法学，通过观察事物在交换过程中的变迁史来分析它们的社会意义（Kopytoff，1986）。尽管期待数据发挥像在临床或者科学环境中的作用有些可笑，从数据经济的角度进行思考可以帮助我们看清这也不完全是一场混乱。社会安排和文化假定使得一些用法、设计和商业模型较于其他显得更加合理可信，也因此形成了一定的模式。

从昂贵的实验室生物传感器到很多人手中相对廉价的生物传感器，这一过程造成了某些使用模型或设计对于特定的消费者市场是合适的。本章的 7.1 节将要研究传感器是怎样从最初研究机构中使用的设备社会化成如今模样的。对于什么是正常和健康的信条来源于以人口为基础的科学，正是基于此，脱胎于研究机构历史的生物传感器总是带着控制他人行为的成见。这段历史造就了对技术设计者们来说最明

显的使用模型：设置并追踪达到高活动量目标的过程以便人们减肥，检测某人的血压并且当血压升高的时候推送关于降压的建议，等等。尽管生物传感器的历史源于研究机构，但这些设备正在快速地普及到消费者领域。目前，生物传感的数据经济改变的步伐已经放慢了很多。尽管该学科是由一系列的假设构成的，但这些假设在最终开发一个消费产品时却不一定都会被考虑。

我们有理由相信这个早期的关于“行为矫正”的社会思潮已经达到极限，并且生物传感的早期采用者已经发现了另一组在消费者层面的考虑因素。本章还将介绍一些生物传感概念萌芽时期的实例，重点在于介绍生物传感如何帮助人们获取对周围世界的感知并且根据自身的知识与经验做出恰当的决定。这种转变主要发生在早期采用者身上，但是其他人也已做好准备加入这次变革。最基本的做法是将个人环境从根本上理解为人类解读的问题。这些早期采用者认为对于某种现象的机器记录是有用的，但最终人们理解环境时所考虑的问题是机器无论如何也做不到的。这种观点激起了关于在各种情况下，什么程度的自动化最有价值的讨论。与第 9 章里将环境形容为一种对于理解数据不可缺少的数据（例如，一个健康护理提供方尝试理解一个患者）不同，这里的环境指的是一个人可以拥有并且利用的。当每个数据流进一步解释了另一个数据流时，这种数据关系就被称为环境数据。但是，当用户处在意义建构的中心时，将一个数据划分成环境数据就显得没有必要了。

首先请明确我并不是在讨论经常说的“个性化医疗”或者“个性化健康”。我的论点其实是为了改变关于我们要去解决的那个问题的固有反应。这个改变与预先定义的有问题的行为相去甚远，其实质是使用技术以尝试远程控制它并且帮助人群和社区自身彻底理解数据，继而做出对他们而言正常且合适的行为。这就要求设计者们不仅需要做出关于这是不是一个适合应用于健康护理的设计的清晰决定，或者是否符合卫生法规，而且需要跳出框架进行创新。这种转变也带来了关于提高传感能力以最大化生物传感器的整体性能的可能性。换言之，传感器是远不足以满足不断增长的需求的。更好的分析工具、数据挖掘工具以及在技术和社会学领域对数据流通的途径进行创新都是必不可少的。

7.1 论证的基础

我是基于长久存在以及最近提出的人类学、社会学、科学和技术研究（STS）以及媒体学知识做出的这个论断。以下是我借鉴的研究的三个部分：

- 前面所有提到的学科共享的长期存在的社会理论。尽管对于本书的很多读者来说可能会陌生，但它们形成了很多当今定性的社会科学研究的潜在概念框架。以下三点是我需要着重强调的：
  - ○ Foucault 1977 年提出的管辖和社会控制的方法；
  - ○ Giddens 1990 年提出的责任化方法；

○ 社会如何看待什么是自然的后结构主义方法（Strathern，1992；Haraway，1990）。

• 我自己的关于人们怎么理解传感器数据的看法。下面三项研究已经阐释了本章的论点：

○ 在量化自我运动中正在进行的研究（Nafus and Sherman，即将出版），这是一个由20000多个传感技术领域中的领先使用者和制造者们组成的组织，他们每月会在大城市内集会讨论他们的生物传感器数据以及其他关于他们心理和生理幸福度的数据；

○ 过去关于家庭能源监测系统用户的研究（Nafus and Beckwith，即将出版）；

○ 过去在美国、保加利亚和葡萄牙进行的实验，其内容是实验员将计算机使用的大量复杂的数据集展示给生成出这些数据集的人（Rattenbury，Nafus 和 Anderson，2008）。

• 近期英特尔公司（Intel）"日常生活中的生物传感"计划中的出版物（详见表7-2）。

"日常生活中的生物传感"研究计划由英特尔公司（Intel）的大学研究办公室赞助，包括了四所大学的研究项目，历时超过3年，于2013年12月结束。我作为当时的项目技术经理参与了本次研究。表7-2详细地列举了这些项目以及项目负责人（PI）。尽管不是每个参与项目中的研究员都对我论点中的每一部分表示赞同，但他们也深刻地理解了我的思想。在本章中，我特意将我对他们工作的意见限制在写作本书时已经由他们发表的部分，在没有收到研究人员明确许可的情况下，不会动用私人通信或者向英特尔公司（Intel）发送报告中的内容。我将此计划的研究成果与社会科学中的其他工作进行了相互印证。

表7-2 "日常生活中的生物传感"计划中的研究项目

研究所：研究人员	焦点区域和目标	研究案例	研究方法
兰卡斯特大学：Celia Roberts，Maggie Mort，Adrian Mackenzie，Mette Kragh - Furbo，Joanne Wilkinson	焦点：风险感知 理解使用健康信息的惯例，与风险和焦虑的关系，个人及研究所的责任观念，社交网络和健康宣传组织的作用	妊娠与受孕惯例 直接面对消费者的基因组学惯例	人种学领域研究 公民专家小组
金史密斯学院：NinaWakeford，Sophie Day，CeliaLury（现任职华威大学）	焦点：新的计算能力 理解每天生活中计算和识数的非正式使用惯例的出现	体重监测公司 生物样本库 艺术实践	人种学领域研究 理论探索 投机性设计

（续）

研究所：研究人员	焦点区域和目标	研究案例	研究方法
华盛顿大学： Gina Neff, Brittany Fiore - Silvfast	焦点：医疗保健制度体系 理解医疗保健系统是如何（不）适应于患者产生的生物传感器数据的	美国初级保健诊所 健康从业者 生物传感技术公司	人种学领域研究
纽约州立大学布法罗分校： Marc Böhlen，Joe Atkinson 及学生	焦点：挑战生物传感器应用的范畴 探究被目前市场框架排除在外的生物传感额外用途	美国和印度尼西亚的公共用水区域（游泳及饮用）	设计、建立和评估工作原型

所有的学识都反映了研究者所处环境中的认知文化，此项工作也不例外。我基本上没有选择以人机交互（HCI）为主题的文献，因为从总体上来说，除了 Leahu，Schwenk，Sengers（2008）和 Böhlen 等（2012）的研究成果外，其他的都没有述及潜在的社会动态，而这正是我想介绍的。我还没有广泛研究相关的心理学文献，因为这些超出了我的专长。

7.2 为什么基于“应该”的技术开发难有成效

第 9 章将基于消费者的生物传感局限于医疗服务系统广泛的变革，并且在研究机构的背景下将基于消费者的生物传感与医疗保健联系在一起。沿着类似的脉络，第 10 章对于生物传感器在健康领域的设计直至今日的发展轨迹持乐观态度。“目前，技术正在帮助个体管理他们自身的生理健康，并产生十分积极的影响。随着传感和相关支持技术正无缝地集成到我们的日常生活中，这个趋势将会在未来得到更加长足的发展。”事实上，正如我在该产业的公开谈话以及私下交流中所见证的，对于生物传感器在消费者市场的作用的描述具有压倒性的一致性，例如针对肥胖、糖尿病以及高血压等可预防的疾病的医疗保健系统是目前最受关注，为消费者使用而设计的生物传感器是一种低成本监护此类患者的方式。它们被视为保证患者在疾病管理中的参与以及将重点从治疗转移到预防的有效方法。由于这种特别的框架已经广泛流行，并且彻底遍及与移动医疗相关的行业大会和研讨会，第 9 章就会对此方式进行更完整的介绍。

然而，通常这种叙述很少会将人们实际上是如何使用市面上已存在的这些设备来作为特定参照。阐释生物传感器在医疗保健中解决某些问题是一回事，而在实践中应用的情况又是另外一回事。如果我们观察一下生物传感器在实践中的使用，我们就

会有更多的理由去保持谨慎而不是单单基于主观臆断其功能。首先，科技的无缝集成并不总是令人满意的（Ratto，2007）。其次，公平地说，至今没有全面权威的影响评估方法来评价这些冲击是否真的是正面的，或者对谁而言是正面的。通常情况下，任何技术上的改变都会产生成功者和失败者，但这一影响并没有被完全确定。实际上，我所管理的研究项目只是一次拼凑出这一蓝图的尝试。想要深入挖掘那些不论成功与否都会帮助人们管理自己生理健康的科技，以及那些构成了生理上的改进有着医学共识但对长期的社会后果还不知情的案例，还有很多工作需要完成。有时身体改进并不像快乐或幸福感，尤其是如果在此过程中会造成人们权利的丧失。

事实上，我们拥有的有限的定性或定量数据用以支持或反驳“技术正在帮助人们管理自身生理健康”这一观点的数据表明，健康怀疑论是有理有据的。例如，Mort，Roberts 和 Callen（2012）指出了远程医疗的使用正在与设计者的初衷背道而驰。他们展示了被远程医疗技术监测的老人们是如何在生产商承诺的“独立生活”中煎熬的。他们反而经常创造性地误用这些技术以得到他们确实需要的照料方式，即人类提供的照顾。有时他们也无法利用技术避免受到生活在监视下的屈辱。在别的领域，大量的工作表明在生物传感器计划进入的领域中，生物传感器或应用程序正在被大量地停用。依靠人工输入的移动医疗和健康程序在前六个月的用户停用率达到 67%，而自动输入数据的程序更是达到惊人的 74%（EIU，2012）。如果按照此前声称的，生物传感器将会被用来减少疾病发作（糖尿病、肥胖、高血压等），这些疾病是由长期工业化生活造成的，那么仅仅长达六个月的使用周期可能并不能如这个产业所宣称的那样解决问题。我自己从量化自我中得到的人种学依据表明，大多数坚持下来的人之所以这样是经历了重要的适应过程。举个例子，步数不再作为考量一个人是否已成功达到白天的运动量的指标，而成为其他现象的环境数据，例如睡眠质量和压力水平。如此高的停用率应该能够提醒人们去质问是什么共同的设计方法造成了此种现象。

有很多可能的原因导致了此种停用，其中一种因素是“问题 - 解决方案”设计方式的流行。这种方式将用户的需求设计为能用技术解决的问题。尽管这是最常用的方式，它却不是以使用者为中心的设计方式（Dourish，2006；Dunne and Raby 2001；DiSalvo，2009）。但是，对于目前论点更重要的是，这种方式蕴含着一个含蓄的假设，无论是问题还是解决方案都是可以整齐地设计在技术的范畴中。这种“问题 - 解决方案”思维的结果就是目前大量的生物传感技术被设计去推荐某种行动或者在一个狭隘的领域内促进目标的达成。例如，一个用户可能会因为参与了更多的锻炼而可以在显示器上欣赏生长的花朵或在游戏中给予一定的分数。这样的设计策略已经足够明显，并且有助于识别出一个独立的问题并创造独立解决方案的条件。但是在实践中，它们体现了设计者在预先确定一个问题时的过度自信，从而造成在实践中对必要复杂性的低估。这些可能是不在用户的控制范围之内的关键部分。

这种方式在很多生物传感系统的设计中被应用，包括那些改善生活疾病的设

备。总体的影响是大量市场上的设备经常使用户产生挫败感，使人们形成不了对感知现象的自我认知。我将以体重监测和排卵监测为例阐释这种总体的影响是如何产生的。在对于排卵监测的所有研究中，Wilkinson（2012）提出了排卵监测仪，此设备能指出可能的受孕期以作为帮助“自然”受孕的工具。排卵监测可以借助监测体温[⊖]，检测唾液、体表的盐分或者尿道内的激素等方式实现。以体温为例，此设备既可采用穿戴式传感器的方式持续测量体温，也可以间歇式地在一天之中抽样。在数据传给用户之前，排卵的数据经济已经发生了一次“交换”：温度转化成了设备对受孕期的推断，这种推断以文字“受孕期”或者一个笑脸展示出来。排卵与笑脸相对应表明它的使用意图是帮助那些想要孕育孩子的人而不是避孕。这里的数据经济在设备生产商和用户之间、用户和合伙人之间（如果有合伙人）、网络论坛里讨论受孕的用户之间，偶尔可能会在医生和患者之间。有趣的是，对于“受孕期”这一词的意思或者根据此读数应该采取的措施的讨论通常发生在网络论坛中，而不是医生办公室。

在设备和用户的交换中，将注意力集中在推测受孕期产生了一种错误的印象，错误地认为存在着一个按照正常方式循环的“正常的”身体。尽管在一群人中这种推测是对的，但是考虑到个人时，它就有相反作用，会使人们认为自己一旦与“正常”标准发生偏离就会被定义为是有问题的。所有的身体都是不同的，事实上，更多的人或多或少的属于“不正常的”那一类，基础体温随个体变化差异极大，对某些人而言正常的基础体温对另一些人可能就不正常了。以判别正常与否为原则来设计设备，设计者会给用户一种错觉认为自己属于不正常的那一类。随着时间的推移，设备的用户会形成一种感觉，认为这些技术提供的判断就是正确的。

异常读数确实会激起用户的焦虑，但是问题不仅仅在于对用户本身的焦虑程度火上浇油；推而广之，给人的印象是通过性交受孕以外的其他结果都是不正常和不被接受的（Wilkinson，2012）。包括排卵监测技术，在涉及面颇广的生殖技术中，“自然的”这一词并不能振振有词地描述一种有技术介入和协助的状态。这种说法是不成立的。人类制造工具已经有上千年的历史了，无论如何已经没有人能脱离技术而孑然独立。实际上，早期的技术，如巴氏消毒法和提高农业生产的方法，都对今天人们认为是“自然的”和“正常的”生育率的形成有所影响。市场营销中将排卵监测贴上“更加自然”的标签隐藏了测量本身也是技术干预这一事实。因此，我们不能将声称的“自然”直接天真地理解为其字面上的那样，而是激起对究竟什么是“自然的”恐惧、欲望和焦虑。

尽管这个论点可能看上去更偏向理论，但是结果确是实实在在的。长时间的研究表明关于“自然”的信仰（Strathern，1992），或是更广义的，关于对于身体而言什么是自然的（Haraway，1991）争论，这些与“自然性”有关的断言都对判断

⊖ 这些不同的排卵监测方法的有效性是有争议的。

什么是令人满意的带来了文化上和道德上的重要作用。还有很多人无法融入这个可取的模具。这些设备的设计正使得“自然的”怀孕在那些通过或不通过性交怀孕的人里面产生承载文化的差异。有很多人起初尝试使用排卵监测，结果却是领养孩子、采用体外受精、流产、共同抚养或持续无子女的状况。尝试着摘掉不正常或者无法“自然”繁殖的帽子的大有人在。

在很多传感系统的设计中，信息和行动的界限并没有在设计中给予适当的划分。设计者希望他们的设备是有用的，而不仅仅是信息性的，因此他们对于鼓励用户基于设备提供的信息采取行动是很有动力的。在很多生物传感的例子中，这会使设备的使用者承受本不应有的负担，特别是最终的结果可能并不局限于与信息相关的行动。这里的传感器设计产生了一种错觉，认为身体在某种程度上是“可以确定的”，前提是只要对其运作原理有足够的了解；可是在现实中，怀孕被归结为用户无法控制的生理现象。用户无法控制精子是否与卵子相遇，或者该受精卵是否会着床，或者其他任何复杂的因素，而正是这些因素使得受孕是个相当复杂的生物过程。最终，即使再多的温度传感也无法改变生物体的变化莫测，而尝试计算受孕的概率实际上是非常含糊的（Guyer，2012）；这并没有有效地引向所需的受孕结果。在这些方面，排卵监测不仅导致了错误的标准，也造成了一种误会，使人误以为“努力尝试”可以改变一个它本无法改变的现状。

当设备的生产商创造了有负面社会后果的设计产品时，他们也就将所有的机会公开了。在生殖中尝试其他方法的人事实上可能会放弃“自然性”的重要性，转而寻找其他适合他们自身情况的设计产品。但是设备的制造商仍然执着于“自然”的概念，反过来又约束了他们正身处其中的数据经济；例如，“自然”隐藏了大量的人们关于排卵的社会实践（Wilkinson，pers. comm.）。它使得排卵与受孕与否成为了两个独立的事件，但实际上与人们将此两者作为整体是截然不同的。随着时间的推移，人们应对和处理这些数据的方法呈现周期性的变化。一个扩展的社交媒体设备应运而生，帮助人们解读数据所蕴含的意义，人们的角色也随时间推移有所变化，因为他们会对该话题越显专业，越有发言权。企业可以通过更密切地关注客户在使用他们生产的设备时表现出的细微差别和进程扩展其市场。如果他们放弃了“自然受孕”作为自己的价值主张，他们也同时推进了其他最终与用户有关各方的发展。这将使得他们能够在这个过程的早期就可以提供关于全方位选择的信息。从本质上讲，排卵监测的数据经济可以比目前更加细致入微，无论是在数据中穿梭的利益相关者，或是数据是如何定义的，并随着时间重新定义的。

排卵监测的后果可能乍一看显得偏激，但生物传感器数据已经以类似的方式工作了更长的历史。对于超重，体重秤、手动输入食物日志以及计步器已经作为测量设备投入与脂肪的紧张战争中（Greenhalgh，2012）。Berlant（2007）将这场向脂

肪宣战的战争称为“残酷的乐观主义”，对于脂肪的“提高认识”㊀，其作为一种文化活动对解决目前的实际问题起到的作用微乎其微，反而妨碍了人们采取更有意义和更有效的生活方式。根据之前提到的来自经济学人智库（EIU）的数据，为管理体重而设计的技术在使用中并没有与设计意图相吻合。至少在肥胖管理方面，它们没有预防作用，或是确保患者在管理中的参与（尽管在远程医疗的应用程序中，用户并不见得一定是患者）。这里，当前的数据经济在专业保健人员、保险公司、设备制造商和设备的用户间传输，形成的条条框框最终导致了不恰当的结论。如果我们继续坚持地认为，生物传感器是保证人们独立管理自身健康的一种方法是大前提，置身于医疗保健系统之外，而且继续认为用户在本质上是患者，那么我们就不难发现居高不下的停用率是一个缺乏顺从或自控的功能的体现。在现实中，还有很多类似的事情正在发生。

“顺从”是一个棘手的问题，它可以判断生物传感器是否真的适用于群众消费。值得注意的是，在西方社会的大多数生活领域，尤其是美国，那些不“顺从”的人正是那些名人。同样值得注意的是，工业化国家人民渐宽的腰围与它们在地域安排、汽车依赖、食品生产和分销的主要变迁、工作种类的变化以及有偿和无偿劳动力的分布都有关系。然而，在我们积极寻找技术解决方案的热情下，这些因素都只是失去了技术人员控制的拼图中的一部分。个人健康监测经常被公认为是一种贡献，而不是一个完整的解决方案，但它实质上是在有问题地淡化社会结构中技术无法管理的重要事宜。问题不在于缺少“顺从”，问题在于人们总是屈服于其他更强大的力量。换句话说，如果不是西方人突然且有意识地决定体重作为影响一系列个体决定的因素，那我们仅考虑通过技术增强的个体自控能够单独地、有意识地决定减重，这个道理并不充分。论及排卵监测，“问题－解决方案”的设计才是该问题的根源所在。它没有充分地考虑到技术以及用户能够控制的范围外的因素。如果我们想要建立真正有用的技术，那么就得坚定地承认个人监测在解决这些大问题时的局限性。

如果健康监测技术仅仅能够贡献一块拼图，那么当其余的拼图开始发挥自身的力量时，其他社会力量也会开始改变技术对于用户的实践、习惯和信仰的影响。那些高停用率的背后反映的是一种周期性的心态变化，从最初的热情到之后的失望。最终，人们为了保持健康所需抵御的巨大阻力使得很多人放弃了坚持。在这一过程中，设备间通信信息发生了变化。每天走两千步作为接近目标的过程而开始，作为一种指标而结束，有权威性和高精度地告诉人们还有多少运动量没有完成。甚至有证据表明，这些制度化的医疗设备和医疗专家的文化联系本身就是问题的根源。Greenhalgh（2012）的研究表明，脂肪（也就是所谓的“肥胖”）作为一个健康问

㊀ 脂肪是 Greenhalgh 使用的术语，以避免使用她认为会造成他人羞耻感的医学术语（如肥胖、超重）。本章遵循她的用法。

题加剧了深陷其中的人们所受的痛苦。从历史上看，脂肪并没有被普遍认为是健康问题，但现在我们说人应该减重，因为这样更健康；而且别人应该减重，因为我们担心他们的健康。礼貌要求我们只考虑自身的情况。Greenhalgh 研究记录的事实显示这样的变化并没有改变人们的观念，反而使情况更加糟糕。关于脂肪在任何情况下都是不健康的这一观念，以及多变的饮食和锻炼者的意愿，正是目前科学界中热议的话题。对于身体进行新陈代谢方式的决定性结论了解不多，然而考虑到生物的多变性，每个人身体的反应可能完全不同。脂肪的后果在个体中也差异很大。作为整体而言是真实的结论——渐宽的腰围与各种各样健康问题之间的相关性，置于个人的案例上就不见得是完全正确的了。

这场争论却很少在研究群体之外进行。所呈现出的只是总体的情况，不仅认为所有的相关机制都是已知的，还假设每个因素对个人而言都是同等重要的。这些统计的总体情况给人以直观的感觉，但鉴于脂肪所携带的重要文化包袱，对于终端用户的影响是极其巨大的。Greenhalgh（2012）表明，因为并不是不礼貌的评论，而是由于权威数据所言，脂肪的医学化导致人们过度识别"胖子"。她阐释了将脂肪视为健康问题的结果只会让人感到更深的羞耻感，并且使作为一个"胖子"的感觉变得沉重且复杂。她展示了人们是怎样将脂肪的感觉内在化，并且将其视为个人身份的决定性特征，而不是深入到社会运动中或是寻求政治变革从而解决潜在结构性问题的。于是很多人采取极端的措施，如延长饥饿和过度锻炼的时间，而这样却会造成严重的生理和心理的伤害。

事实上，这种倾向将关于身体的负面情绪内在化，或是将负面信息内化为令人担心的更深层性格缺陷，已经超出了关于体型的问题。很多社会学研究记载，西方文化已经转移为有责任感的文化（始于 Giddens，1990 的大量文献）。在责任感文化中，不管社会力量是如何运作的，个人的选择是问题唯一可能的起因和唯一可能的解决方法。此文化中，首选解决问题的方法是基于个人的，但是这些方法却不是根据每个个体单独设计的，而是由专家设计，再由那些已经被专家知识同化了的个体实施（关于这种社会动态是如何在大数据背景下运作的讨论请参见Cheney - Lippold，2010）。这就意味着本应该提供给个体作为他们医疗保健中活跃参与者的控制权，在实际中却经常并未被真正授权。这并不是个人机构的扩展，而是那些定义并规定亟待解决问题的专家和机构的权力正在扩张。这种文化上的转变正在渗入当前的生物传感器市场上，但值得注意的是，目前市场上甚至整个医疗保健行业中所体现的也只是冰山一角。例如，2008 年大萧条中它起到了作用。刚失业的人十分清楚正在发生作用的巨大经济力量，并将其他人的失业归咎于这些巨大力量的结果。尽管如此，他们将自己的失业归咎于个人的失败，而不是更广泛的社会现象。可以预见，那些声称可以帮助人们增强就业竞争力的书籍、博客、甚至新的技术将会继续涌现，并且消除自我怀疑（Gregg，即将出版）。

设计的框架普遍声称生物传感器技术可以通过个体管理和监测责任感（未对

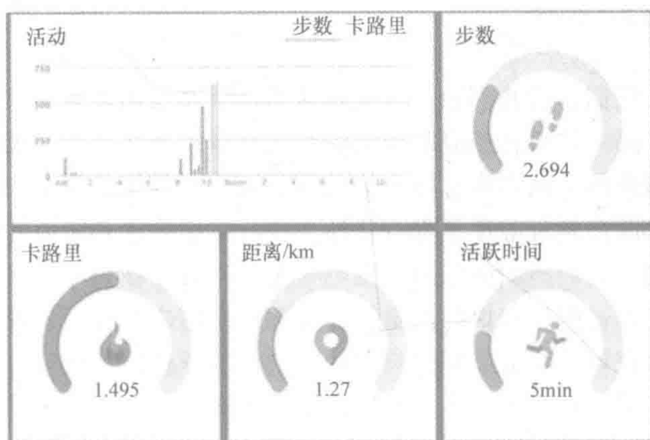
监测对象进行个体化的控制）能广泛地解决生活方式引起的疾病，过于强烈和一致地呼应了更广泛的文化向责任感的转变，只不过是巧合。当我们的个人责任意识发展到以至于我们再也看不出或说不出是什么正在发挥效力的阶段，这就变成了阻碍而不是帮助。虽然我们设计时必须考虑我们所处的文化背景，但是当我们可以更加清晰地看到是什么正在起作用时，我们就可以选择利用这种文化中更具建设性的方面。一旦我们可以发现责任感文化是如何运作的，我们就可以发现运动员之间也存在着天壤之别（或者那些热衷于任何使用技术的一种设备来记录身体活动的人），以及关于这些设备可以解决肥胖危机的论断是天方夜谭。在幻想中肥胖可以通过加速度计和游戏化来解决，技术确实发现了市场需求，但是需要在采取措施与随后绝望构成的循环背景下成形。这与那些对人的身体进行重大改变有意义的支持是不同的。相反，就像在排卵监测中那样，应用于健康管理或减重的技术是为了营造一种意识，将某事物预先定义为目前存在的问题，那么无论被认定的问题正确与否，这种预定义都会创造行动的必要性。

有很多现代健康管理设备的例子可以说明它们的设计选择是如何融入我之前一直在讨论的责任感文化中的。图 7-1 简明扼要地展示了大多数基于加速度计的健康管理设备是如何工作的，请注意数据在传递到终端用户前的三个步骤中发生的简化。设计者们决定对于目标用户群体的相关数据；例如，某些设备生产商只显示每天行走的步数。但是如果用户正在尝试培养早晨散步的习惯又该怎么办呢？其实这些步行发生的时间也是相关的信息。它可能是集中在早晨进行的步行，而紧随其后的是久坐的工作或是运动量极少的一天。为此，一些步行确实要比另一些更有价值。即使在数据被清除并转换为“步数”之前，终端用户也极有可能从加速度计产生的原始数据中发现有用的部分，而很少有设计者会提前有此种考虑。终端用户几乎不可能获取到除了“每日步数”之外的其他数据，由此表明，像这样设备的设计者在正常设计的过程中已经对于该进行强调的对象做出了选择。他们做出强势的假设认为设计者才是应该拥有预定义问题和解决方案的特权者，因而不会开放这些数据用于其他更加丰富的计算和解释。他们为用户留下很少能够根据环境不同而调整设备的余地。

包括 JawboneUP、Fitbit、Fuel 和 BodyMedia 的很多健身设备只强调每天的目标，图 7-2 显示的是其中一种，即 BodyMedia。这个例子并不是为了提醒其中某一个生产商，而是为了说明一种很多系统设计者共用的方式。

图 7-2 的右侧说明了许多人是如何解读数据的。事实上对于这些数字的解读可以是多种多样的，但这些通常是作为主题出现在研究中。例如在很多系统中，让用户达到自己设定的目标步数或者消耗的卡路里是可能的，但是却很少有系统会根据个体之间在生理、地理以及家庭和工作的限制上的差异，给用户提供建议告诉他们什么样的目标是合适的。设计中，关于测量什么以及如何测量的选择已经暗示了即使在没有人清楚地知道理想是什么的情况下，这种理想也是存在的。在短时间内这

设备显示效果



设备传递的信息

- 理想是已知的
- 大部分时候你达不到理想的量
- 这个理想对每天而言都是合适的
- 天是最重要的时间单位
- 只有这些是可能相关的因素

图 7-2 用户界面通信

可能是有激励作用的，但是当生活的现实开始产生负面效果后，激励作用也就随之停止了，而变得使人意志消沉。它就沦为了仅仅是提醒用户差距的提示器。当前的设计主要以天为基数进行统计，然而对于那些有长距离旅行跋涉的人群来说，以周或月为基数来管理他们的运动量和卡路里消耗更合理。对于强调以天为基数统计结果的重要性在很多人的生活中几乎是完全不起作用的，而这一切都是想象中才会出现的完全有规律的人的缩影（参见 Gregg，即将出版）。当我们通过特写和在一定情境中看待事物时，我们总是会进行各种高度复杂的时间取舍、组合以及重排（Darrah et al.，2007）。

最让人忧虑的是，这些设计已经作为一个框架含蓄地对到底什么与健康有关进行断言，造成的后果就是只有很少一部分措施被认为是相关的。大多数设备都没有要求他们的用户测量引起懒惰的人工照明、用于微生物评估、暴露于质量差的空气中、天气情况或者对某种特定食物的反应的时间。其中有些在技术上是很难实现的，而且也确实在政治以及科学上充满争议，但是不论我们能否从科学的角度解释肥胖的成因，但想要否认肥胖很可能比卡路里和锻炼更复杂这一论点却是很难的。正如第 10 章指出的，卡路里消耗在技术上是难以监测的，并且会产生对于准确性的错觉。另一方面，根据我对量化自我参与者的研究，卡路里消耗是出了名的难以追踪，它很复杂因为部分数据只能估算，特定营养物质含量也无法测算，更为估算造成了重重困难。但如果一个人愿意背负饮食、环境以及经济上的风险尝试只食用加工食品，那么这项工作量是可以在某种程度上减少的。然而，卡路里和活动水平的监测是目前市场上设备的主要焦点。通过强调单日的统计、减少相关信息的选择性并且创造一种理想状态的印象等手段，这些技术完美地与更广泛的责任感文化合拍，而在这种文化中，远程地控制他人的行为可以被视作是一种个体的解决方案。

7.3 基于“应该”设计的后果

这些例子有什么共同点吗？它们告诉我们第一代生物传感器只是根据外表判断传感和测量的对象的医学模型。第一代将已经完整建立的基础科学以及从总体扩展到单体水平的轻松程度视为理所当然，认为对总体来说是好的事物对其中任何一个单体而言也必然是好的。它们从医疗系统继承了部分特性，特权专家对患者行为的控制以及专家对测量对象的控制，它们所面向的用户也不一定是患者。我们可以很容易地看到它在数据经济中的出现：医疗知识、设备制造商和终端用户都在一个紧密的循环中。这种特性主要发生在设备制造商和用户之间，具体的商业模式也有可能包括临床医生或是保险公司。医疗知识决定了什么数据是应该被采集的，不论是直接到由医师设计设备的程度或是间接的由医学框架决定哪些问题是值得解决的。数据传输至用户时，用户此时解读数据的方法已经被限制于仅有的几种方式了，但是给用户的印象却是，这些反映出的问题应该由他们自己解决并且只能在该设备提供的范围内解决。尽管存在一定程度上的“社会”成分，例如为了与他人竞争或是互相激励而分享数据，这些成分并没有为用户开辟新的解读数据的方法。可能的发展空间确实是对数据经纪人和广告商开放的，但却并不会实质性地改变用户体验。

这样发展的后果是传感器的测量结果比传感器本身更具有权威性，而且技术设计者也作为医学权威的延伸变得更具有话语权来辨别什么是有利的。这是以付出人们真正了解自身身体状况为代价的。只关注“应该”带来了问题，它制造了更多的内疚、羞愧和对专家的依赖，这些比它实际应用中带来的帮助还要多。目前的设备为人们自身探究这些测量对他们究竟有何重要性提供的机会并不多，也没有为人们参与新知识、科学或其他的创造过程提供平台。而这些是具有重大的社会意义的：对某个问题而言，看上去最具权威性的答案可能彻头彻尾是假的，或者随着新知识的出现而变得过时被淘汰。在一个有限的数据经济中，数据分享的做法只限于用于激励彼此，用户并没有机会互相学习。如果我们都已经知道什么是一套“好的数字”，即高活跃度、低糖、低重，那么除了索取鼓励和用于吹嘘之外，分享功能所能提高的程度就极为有限了。数据会变平淡，很快因为失去吸引力而变得无趣。

也有很多实例中，传感器告知人们应该或不应该做什么是绝对合适的。实际上，Böhlen 等人（2012）指出在自愿和非自愿之间、必要和非必要之间的生物传感实例间的重要张力。同样，运动员并不会因为负面反馈而深感羞辱，跑步或自行车指导技术通过一些不会引起广泛的羞耻或责难的方式来帮助人们调整动作。前面所叙述的社会成本应该已经足以说服人们改变设计策略，对于设备制造商和服务提供商而言，这是一个实际存在的业务成本。用户基数的高流失率对于更具颠覆力量的硬件制造商来说是个好机会，但也应该关注到那些承担着与获取客户有关风险的

服务提供商。

7.4 为什么设计需要考虑种种“可能因素”

很明显，很多领域的问题并不能预先规定一个人“应该”做的事。过敏就是一个例子。许多人都有过敏症，但每个人对于过敏源的反应是相当不同的。不同的人体不仅仅对不同过敏源的反应有差别，不同的过敏源组合以及环境差异也是因素之一。在我自己的研究中，一位女士告诉我，她认为自己对“中国食物”过敏。她并不知道中国食物中的具体哪种物质是导致她过敏的罪魁祸首，但能够避免摄入这种物质的能力要比精确了解过敏的化学成分更重要。在这位女士的案例中，她每周的生活模式都相对固定，每周五前往健身房并在健身结束后食用中国食物。在其他的日子里，她没有前往健身房但依旧食用中国食物，却并没有过敏反应。基于她有一个明显的、人类可辨的模式，那么潜在的问题变得清晰了，她的过敏症必然与健身房和食物的结合有关系。

在这样的案例中，人们并不需要一个有着预定目标的系统来达到要求。他们需要一种方式来形成自身对于即将可能发生事件的假设。大多数的过敏患者没有那么幸运，会有这样明显的模式可以让我们注意到一个结合关系，像健身房和中国食物这样的。然而，机器非常擅长找出这样的模式。如果每日的生活模式并不明显，机器可以帮助识别出纷纷扰扰中潜在的模式。每个系统也未必能得出一个结论性的答案，相反，它可以提议一些可能的方式，可改变或是可避免的习惯。在“日常生活中的生物传感器”项目中，研究员沿着这个方向发现了一系列人类经验：睡眠、头痛、疲劳、情绪、哮喘等都具有源于日常生活这一特点，并且复杂到使得人类对这些模式的探测非常困难。医疗系统在这些情况下大多没有帮助，有用的解决方式通常是非医学的。这些问题同样也没有带来传统的生物传感器交互设计策略中出现的人文的负担以及羞愧感。对一个人来说，头痛可能与空气质量相关。另一个人可能会在听了第一个人的体验后尝试测量空气质量，如果两者之间并不相关，那么他们可能会尝试测量睡眠质量或是咖啡因摄入量。从一个传感器移动到下一个传感器的过程是一个已知的实践。人们参与量化自我运动时很少坚持只做一类感受训练。当他们产生了想要探索的新领域的意愿，他们就会移动到下一个，有时是为了乐趣，有时是为了实际需要。举个例子，我曾会见过的一个人正在使用 Zeo 对自己进行睡眠追踪，随后在几个星期后，他发现这些数据变得无趣并且没有帮助。在那段时期内，他还开始对自己的情绪进行追踪。他发现 Zeo 记录的数据是非常重要的环境数据，非常显著地帮助他辨别他的情绪到底是指向了一个他过去曾经经历过的心理健康问题的开始，或者他只是需要一晚安睡。因此这个案例意味着在市场中有颠覆能力的搅局者是一个多么有成效的角色。与由于挫败感而放弃一个传感器相反，长期的自我追踪能逐步形成对自身个体如何工作的理解，通过将不同且必需的传感

器技术组合在一起，有效地完成他们自身独特的传感器融合。

今天，完成这些演化的传感器融合是乏味且费劲的，其实它并不需要这样。图7-3展现了当重点更多地放在探索和意会上时，一个基于生物传感器数据的数据经济是如何运作的。然而，这依然存在于假设层面，用这样的方式描绘出的结果与图7-1中所示的有着天壤之别。在这样的情况下，最终用户开始猜测会不会是空气质量或者是她日常饮食中的其他东西可能触发了她的过敏。她开始追踪这两类情况，但没有发现与她的过敏症有关联。虽然一开始的假设是空气质量可能与过敏反应有关，而此假设已经在这个案例中被证实是错误的，但它能提示用户更多地使用定位追踪，然后患者就能决定调整她的慢跑路线来避免其他可能的影响。在这个假设环境下，定位追踪开始作为一个基础来检测患者提出的新的猜疑，那就是出行可能与过敏有关。这个新的假设的出现是由于患者将她的数据连接到社区论坛，进而帮助她意识到这个因素的存在。事实上，因为她持续拍摄自己的食物，她可以看见与场所有关的日常饮食，接着发现自己的过敏是与酒精消耗有关。

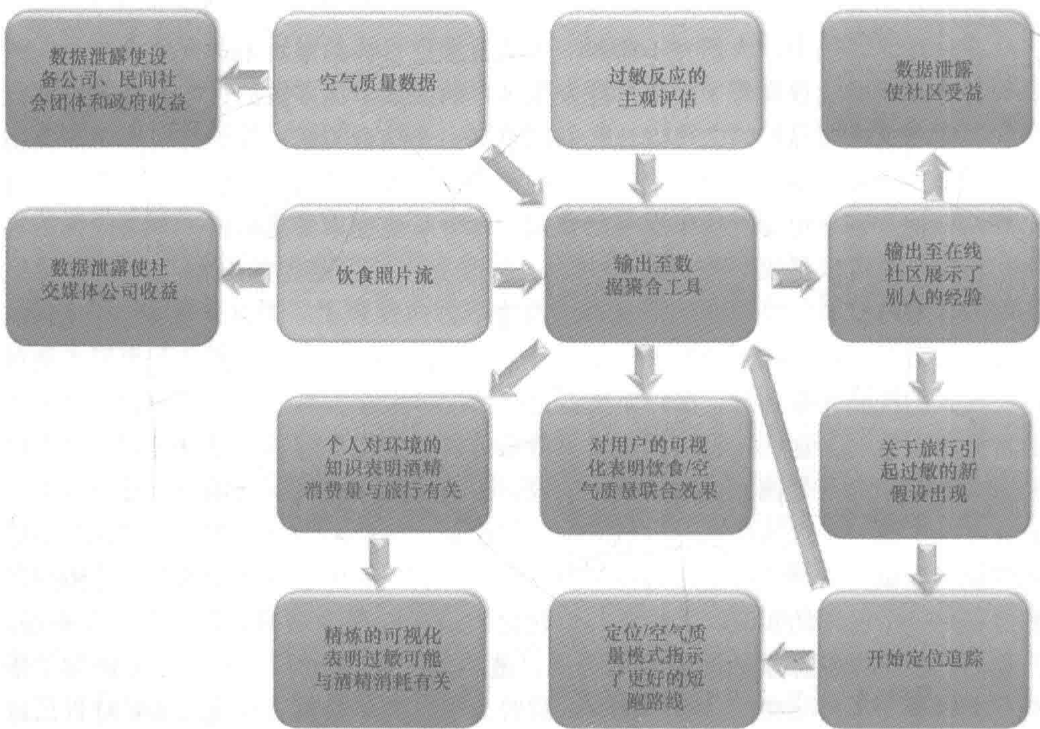


图7-3　一个数据经济探索过敏的例子

在这种情境中，终端用户得到两个好处：一个是她发现了一个更好的慢跑路线，另一个是她找到了自己过敏问题的原因。机器对于模式的发现及进一步聚合的能力能支持终端用户自己做决定并建立自己的假设。设备不再盲目地去追问答案是什么，反而，随着时间推移用户尝试去解决的问题也在变化，她对生物传感器以及

其他数据的使用也随着发展改变。在这个情境中，不同的设计者可能会对关于多少自动操作是有帮助的这一问题产生分歧。一些终端用户会想要了解更多精细的数据，而另一些终端用户会想要一个系统来提醒自己其他人想要收集的东西。没有一个空气质量检测系统生产商能够预料到数据可能带来的所有使用方式，但数据能以设计者无法预料的方式进行聚合的能力使得终端用户和公司能从数据泄露中获利，这些数据流并不是单向的。随着数据安全技术的提高，人们可以更好地控制数据泄露，更多地保持平衡。另一个差异是数据的受益机构更多样化，这样揭示了存在额外解决方法的可能性，尽管想要简单地通过改变穿越城市的路线来避免糟糕的空气质量是不可能的。当然，完全有可能的是，在这样的情况下多样元素的卷入会产生较弱的关联或者冲突诱因，并且不会希望数据以这样的方式进行交换。但是通过强调探索，我们开创了许多可能性，包括产生队列或是反过来管理冲突诱因，并且降低数据轻易被淘汰的概率。

一旦我们从原来思考机器告诉我们需要做什么转移到机器告诉我们正在发生什么，那么愉快和乐趣的作用就会改变。在移动健康领域中，有很多关于游戏化的尝试，在本书的前言、第 10 章和第 11 章都有提到。在游戏化中，开发商采用奖励系统来诱使人们去做一些对自身有利的事。一些设计者已经成功地使用了这些技术，但相比巴甫洛夫实验中流口水的狗，人们更加期望之后的治疗方式。我们早已看到了很多例子，关于人们通过调节目前市场上的传感器来达到娱乐和创意的目的。事实上，我和一位男士谈过，他过去出于纯粹的好奇心穿戴过一个持续的心脏监护仪，随后，他在穿戴设备的同时发生了一场车祸。那个时刻的数据流给他留下非常特殊深刻的记忆。监护设备并不能用于诊断或是疾病治疗，而他与那些数据的关系并不是用“愉快”就能最好地形容，但那些数据却对他有着重要的意义。他认为这是一个契机来纪念他所感激的对象并分享给了他的家人。

同样地，基因组学在过去只用于确立疾病的风险。人们通常认为这个信息并没有用，因为通常除了饮食健康和从事锻炼之外并没有采取其他的行动，而这两项是在任何情况下都需要做的（Bietz，2013）。同样的效果还发生在人们检测 DNA 来获取遗传信息。从基因角度来考虑一个人的遗传信息并没有任何收获，但有人却发现了一些有趣的事情。在一些领域，这些以娱乐为目的的实践再一次陷入了羞愧和内疚的循环。超声波就是一个研究得非常透彻的例子（Roberts，2013）。将一个婴儿的超声波转换成为一幅三维的图片，在一开始可能会让人觉得愉快或讨人喜欢，事实上这非常的普及，甚至在超市里就能买到这样的图像。但放到文化政治中时就会感到非常的棘手。很多人会利用这些图像围绕着流产挑起文化战争，或是世界部分区域正发生的高概率的母亲杀婴事件，它们可以被用于在婴儿出生前或出生后进行性别选择。以这样的方式，一开始的游戏就逐渐演变得极其严肃。

从人类学的推算（Lave，1988；Verran，2001；Guyer，2004），我们知道人类要比机器更好地适应处理复杂且多样的系统。举个例子，Gerlitz 和 Lury（2012）

就通过测量受试者的社会媒体影响，来展示人类的乐趣是如何深植于复杂性中的。对于那些关注自己的社会媒体地位的人，那么这个游戏是不断校正的过程之一。度量指标将会持续地伴随着那些更有执行力和影响力的人以及那些更多去聆听而不是谈论的人。它并不根植于“失败”，而是与成功的一样有影响力。事实上，在一个关于计算机和时间使用的研究中（Rattenbury，Nafus 和 Anderson，2008），来自三个国家的计算机使用者展现了极其复杂的多元数据集，这些数据集呈现了这些受试者们实时的计算机使用——包括应用程序、键盘敲击频率、计算机位置等——毫无困难地剖析这些信息，解读出在那个时刻发生的故事以及这些计算机以这样的形式使用数据的原因。在“应该”的世界里，主要的宗旨是将传感器解读做得尽可能的简单，这样才能将确定的信息进行传递。但这样不能有效地应用于不同教育水平和背景的大量人口。

有时候人们想要传感器能基于简单有经验的知识呈现事实，其他时候什么是“真实的”却不在掌控之中，此时就由一些其他的人类创造力的表现形式进行接管。举个例子，Leahu，Shwenk 和 Sengers（2008）验证了可以依据一种游戏的延伸方式了解人们是如何与机器推断状态可能有所联系的，虽然并不明确机器推测用户的情绪状态是正确的还是错误的。值得注意的是，通过耐克公司推出的 NikeFuelBand 手环来测量体能消耗是完全编造出来的。对于“燃料”并没有一个明确的定义。当然，它与加速度计是有关的，但加速度计并不会测量自身“燃料”，因为根本就不存在。所以，我们并不需要基于任何先验信息来束缚生物传感器测量值。没人会关注“燃料”直到耐克公司将它提出来。这些手环的使用者开始不同程度地关注自身的“燃料”值，这依赖于他们如何使用这个“燃料”手环。有时候他们会觉得好玩来摇晃手环，因为他们知道这样可以提升数值却没有任何实质的运动，而有时候在坐着的交通工具里经过崎岖不平的路面时意外的晃动也能产生一些意外的值。这样，相比我们的预料还有更多的“可能因素”存在于传感器。不仅仅开启了新的物理通路，还能产生新的关于我们如何能量化我们的世界的娱乐性虚构故事。

量化自我运动是目前最具体支持“可能”的实践和演讲的形式。在量化自我的会议上，人们分享对自己身体发生状况的假设，为什么他们要追踪这些选择的数据，以及他们从中学到了什么。他们还会建议别人还有什么可能会发生，学习追踪适当的现象，进一步了解可靠的技术来进行追踪。基于社会基础，“可能”也许会变得比量化自我更加庞大。Marc Böhlen 和他的团队（2012）从一个设计的角度来展示“可能因素”假想的形象。比如说，这些观念其中之一提议采取环境数据和可穿戴传感器对环境的响应数据对散步的地点进行建议（也可参见第 11 章）。还有很多推荐需要进一步确认，但不可否认它提供了一些新的选择而不是去责备用户。它有助于对新空间的享受，促使个人对城市进行偶然的探索，了解新的事物。佩戴生物传感器去远足，结合拓扑地图和用户携带的饮用水含量，一个系统可以帮

助用户评估哪一类的远足更实际。这些都以新颖而引人注目的方式拓展了人们的视野。

7.5 “可能因素”数据经济的要求

当我们从探索和愉快的角度开始，而不是自我管理和顺从，那么我们可以帮助人们创造并获得那些他们与数据之间产生的价值。在“可能因素”的世界中，生物传感器的使用需要一种更好的方式来连接不同种类的数据，将每种数据进行合作、巩固，然后定义出新的使用方法。

为了使数据对终端使用者更加有帮助，那就需要增加参与生物传感器的数据经济中因素的多样性。过敏症的例子就很清晰地说明了连接不同种类的数据的必要性，这样可以使得人们通过探索来发现一些新的数据来源。而要做到以上这点，就特别地需要能联系环境感觉和身体感觉的能力。消费者等级的环境传感器才刚刚出现，因此想要实现环境图像的加入非常困难。这些环境数据可能一开始并不会表现出与健康的相关性，或者直接由传统的医疗保健利益相关者提供。同样地，数据聚合的受益对象需要扩展。取代与特定朋友分享个人的个体数据，终端用户事实上也对聚合数据非常有兴趣。“Asthmapolis”项目（现在更名为一个叫作“推进健康”的商业公司）推出了一个绘图系统，通过位置追踪哮喘吸入器以记录他们哮喘发作的地理位置，这样人们就可以通过地理绘图提前意识到潜在的刺激物。这样采用分享数据的方式来试着辨别一个人的哮喘发作来源，成为了一种有价值的实践，可以获得合作和相互的利益。

目前，可穿戴技术的设计使得构造多重传感器变得困难，让运动追踪器 Fitbit 与睡眠传感器比如 Zeo 沟通犹如进行举重，就更不用提与空气质量检测仪进行数据交流了。将数据输出成一般的格式对于没有编码技能的人来说是非常困难的，并且对于设备提供商能和不能提供的信息尚没有明确的共识。即使是量化自我运动中的一些积极参与者有时也不知道，举个例子，我们不可能从 FuelBand 手环中将原始数据提出来，除非与耐克公司建立商业关系。没有一个生物传感器的生产商能预测到产品的任何一种适用功能，但我们最近有一个系统已对外公开编程接口，它的特点是依据于大量可获得的数据，不过尚且存在的不足仍未解决。在本书编写的同时，已有许多创业阶段的公司和项目，例如 Singly，Quantify. io，和 Human API，正在填补市场中的空白（参见 Franzen，2013）。在医疗设备领域，“持续联盟”已经在提高医疗设备的互操作性上得到了很大的进步，但并非所有的生物传感器设备都是医疗方面的，也并非所有与用户想要了解的相关的数据流都能从生物传感器得到（例如先导型用户经常使用定位信息帮助理解自身的饮食习惯）。在消费者方面，数据的供给也没有个人预期中那么稳定，因为开启还是关闭数据服务是由公司决定的。

尽管每个技术系统中数据采样率和数据总量存在折中取舍，良好的数据精细度对于开发新的应用却优于任何一位设计师能设计的。一部分终端用户也能从这些数据中发现价值，前提是他们能获得数据阅读权限并且有更稳定的方法可以控制数据流向和他人所有的权限。数据使用控制（DUC）是一项重要的技术（Maniatis et al.，2011），因为它能允许使用者在这些数据海洋中安全地徜徉。数据使用控制能在得到允许后在使用者控制下打包数据，就像一位 Facebook 的用户将一张照片上传到 Facebook 上，他们可以控制谁能看见这些内容，而这并不需要 Facebook 本身具有可以引导面部识别的能力。这样就可以在不放弃个人原始数据的条件下，采用一个安全的方式从总体数据中获得利益。

我们还需要分析模式和机器学习模式，这样可以更进一步帮助人们建立假设并发挥出那些关于自身信息的作用，同样还能利用机器来辨别一些人类不易察觉的行为模式。可能在我的研究中，帮助参与者确认是健身房还是中国食物导致了她的过敏的不是单独某一个传感器或产品。然而，能够轻松地以人们容易理解的方式聚合数据源，使得用户可以建立自己的假设，再将不同的数据联系到一起，这是一个非常重要的能力。量化自我研究中的早期特点表明根据简单的周期来对数据进行简单分类（例如，周二晚上的睡眠质量通常较好）和使累积的效果更具可视化的能力（例如，堆叠图所示的结果可能是除非糟糕的睡眠质量持续两周以上，否则它对体重的影响都不是如表面看上去那样明显）是两种体现出机器识别远胜于人类感知这一优势的简单方法。这些都是一些常用的处理步骤，进一步的分析需要获取更成熟的机器学习能力。但如果我们的目标是让人来了解而不是机器进行推断，清楚地知道什么时候停止预测与了解应该预测什么是一样的重要。

对分析工具和数据处理进行不同的思考，会提供不一样的方式来支持更广阔的数据分析。数据读写不是简单地执行算法，而是用数据来回答问题，并且以非常严谨精密的态度对答案进行翻译的能力。这可能并不涉及算法的技能。并不是每个人都想要拥有或者能够拥有统计计算的能力，有了这个能力就可以依靠现有工具用数据来回答我们想要提出的问题。而拥有高等级算法能力的人也可能做不好数据分析，或者提出一些错误的问题，或是不能严谨精密地翻译他们从数据中得到的答案。事实上，在 2012 年的时候就爆发出了一个公共丑闻，Target 作为一个美国大型零售商，它根据一位顾客的消费模式得到的推论将怀孕相关广告发给了她，但这位顾客并没有告诉她的家人关于她已怀孕的事实。在这个例子中，复杂的算法技术将这位顾客列入了“怀孕者”的数据库，然而对数据的不足分析使得没能成功地翻译出这个数据库所代表的含义。

目前，在设备生产商为了方便使用而对功能施加的限制和例如 R 或者是 Matlab 等通用类统计工具对计算的要求之间存在着一个鸿沟。大多数人都能很好地在没有经验的条件下提出大量的问题或是对关于循环的模式进行发问，但今天的许多工具并不具有这个功能以允许人们这样做。在我进行写作的同时，英特尔（Intel）实验

室正在构建一个能够支持数据分析的工具，来对量化自我社区在研究过程中提出的许多想法进行检验。图 7-4 展示了这个工具是如何支持人们尝试去了解自己的数据。就目前而言，这是唯一能稍微填补鸿沟的工具。

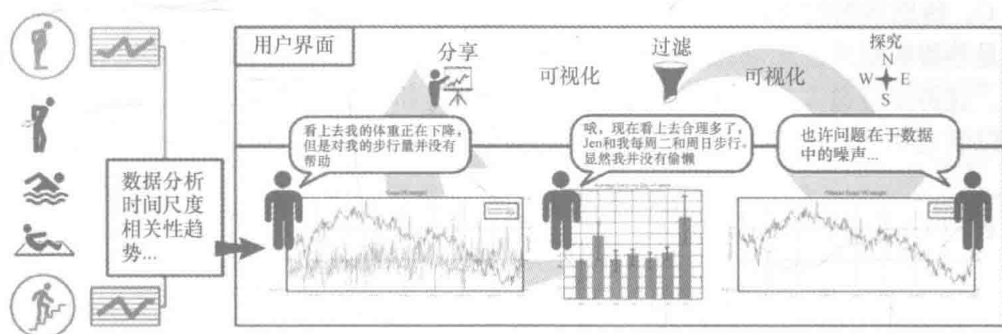


图 7-4　在量化自我社区中使用的英特尔实验室数据处理工具的示意图（由 Pete Denman 供图）

升级应用程序界面需要其他途径来将数据聚合到一起，再提供给非技术人员。那么创造出一个充满活力的生物传感器数据经济是至关重要的。一个充满活力的数据经济可以帮助人们调整并融合自身的数据，然后在一起建立一个新的假设，而不是仅仅从单一的个人得到。若是没有分享数据，人们就没有更多的方法辨别是否是自身的身体表现出了差异，或是像大多数参与我们研究的受试者一样，相信自己只是“没有做好”而已。我们再一次地增加了实验。即使是对比两个人的 Fitbit 运动追踪数据流也能帮助他们了解这些仪器是否在工作。在研究中有很多案例，人们都很自信地误用传感器去做违反了标准的事，即使这些标准已经告知他们应该如何去做。一个人告诉我们，“我并不像大多数糖尿病患者有偏头痛的症状。大多数糖尿病患者有偏头痛是因他们的血糖过高；我恰恰相反。”虽然这些相对依靠规则来说更依靠自己的人只是个例，但有了更好的分享数据的方法，会有更多的人能更自行地得到相似的结论。他们会知道应该尝试什么以及为什么该这么做。

然而这意味着，在考虑“可能因素”的数据经济中进行“分享”需要一些再加工。在这里，适当的分享如同一个人保存了所有人都想要获得的内容。举个例子，适当分享在流行偏头痛上分析聚合统计或是判断个人的偏头痛是否要比平均更严重并没有帮助。那么哪些是有用的，哪些应该做到隐私保护，这些判断更多地与另一个人的经历内容相关，这样用户就能评估是否这是合适的比较，并且从那个人的经历中进行学习。一个用户会想要了解，是否那个人也会有睡眠困扰？那个人也会有和我一样的饮食吗？一些相似的人们聚集成团体，这非常有帮助，但总的来说，关键在于人们能想象到什么，不仅仅是从抽象推断出来。重复出现是常常出现的，但它们却不是完全一样的。要做到的是展示出一个人的数据的主要部分，这样另一个人才能了解，但分享原始数据或其他标志性的数据却不在他们的权限范围内。

最后，在一些案例中需要给出推荐，我们需要这些建议以超过游戏化程度的更令人惊讶和愉快的选择展示出来。从用户的观点看来，这些数据之间的结合和联系一定会得到增加。它们一定要协助人们按照自己的方式沿着一条路从 A 到达 B 再到 C。传感器系统可以展示给用户他们可能不会选择的路径，但开发人员却不应该仅是等待数据堆积起来之后，和所有的结论性的答案一起进入一个单一集中的系统。这需要传递实时并且个性化的价值。即使是简单地对比两个数据流间的差异也可以满足要求，但从一个终端用户的角度来看这也是非常困难的。

7.6 小结

本章展示了对于研究机构的生物传感器在目前产业内应用的思考。伴随着它们进入消费者市场的是一些设计选择，这些设计使得生物传感器成为一些机构或者专家对人们的控制。同时，这种选择也制约了推广使用并带来了负面的社会影响。但是，人类学研究中大量的例子表明终端用户是可以完美地诠释生物传感器数据中的含义，并且通过扩展的功能来挑选追踪的目标和方法而最终获益。这种方式引入了一种更具探究精神的社会思潮，什么是“可能”的风险而不是“应该”怎么做。它还为生态系统中的数据创造了更多的价值。

这并不意味着一个特殊的传感器比另一个传感器更重要，而是当新的需求出现时，人们会想要创造出一个彼此合拍的整体系统，该系统能够改进和提供可以选择的用途以及提供更准确的数据。还有一些附加的要求已经超越了传感器设计本身，按照此方法将很有可能支撑起一个生机勃勃的生物传感器生态系统。在此系统中将会有更稳定、可扩展的应用程序界面和面向终端用户的安全技术使得人们更切实地管理他们的数据，会有机器学习能力更强的应用以避免人们陷入机器推断的牢笼，会有能够支持更大更快的数据读写的接口，会有支持超越巴甫洛夫式游戏化反应的设计策略。

参考文献

Berlant, Lauren. 2007. Cruel Optimism. Raleigh, NC: Duke University Press.

Bietz, Matthew. 2013. Personal Genetic Code: Algorithmic Living, Genomics, and the Quantified Self. Society for Social Studies of Science 2013 Annual Meeting.

Böhlen, Marc, Ilya Maharika, Paul Lloyd Sargent, Silvia Zaianty, Nicole Lee, Angelica Piedrahita Delgado, Nevena Niagolova, and Fabian Vogelsteller. 2012. Prototyping Ubiquitous Biosensing Applications through Speculative Design. 8th International Conference on Intelligent Environments (IE), pp. 198–205. IEEE.

Cefkin, Melissa. (Ed.). 2010. Ethnography and the Corporate Encounter: Reflections on Research in and of Corporations. New York: Berghahn Books.

Cheney-Lippold, John. 2011. A New Algorithmic Identity Soft Biopolitics and the Modulation of Control. Theory, Culture & Society, 28(6), 164–181.

Christensen, Clayton. 1997. The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail. Cambridge, MA: Harvard Business Press.

Darrah, Charles, James Freeman, and June Anne English-Lueck. 2007. Busier Than Ever!: Why American Families Can't Slow Down. Stanford: Stanford University Press.

DiSalvo, Carl. 2009. Design and the Construction of Publics. Design Issues, 25(1), 48–63.
Dourish, Paul. 2006. Implications for design. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (pp. 541–550). ACM.
Dunne, Anthony, & Fiona Raby. 2001. Design Noir: The Secret Life of Electronic Objects. London: Springer.
Economist Intelligence Unit, Price Waterhouse Cooper. 2012. Emerging mHealth: Paths for Growth. www.managementthinking.eiu.com/sites/default/files/downloads/Emerging%20mHealth.pdf
Foucault, Michel. 1977. Discipline & Punish. New York: Random House.
Franzen, Carl. 2013. Free Your Fitbit: Can a 'Human API' Liberate Your Health Data from Corporate Overlords? Retrieved from http://www.theverge.com/2013/6/4/4392996/fitness-tracker-data-platforms-launch-giving-users-control.
Giddens, Anthony. 1990. The Consequences of Modernity. Cambridge: Polity Press.
Gerlitz, Caroline, and Celia Lury. 2012. Self-Evaluating Media: Acting on Data. Paper presented at "The new numeracy? A conversation about numbers and numbering practices." Goldsmiths College, London.
Greenhalgh, Susan. 2012. "Weighty Subjects: The Biopolitics of the U.S. War on Fat." American Ethnologist, 39:3, pp. 471–487.
Gregg, Melissa. (Forthcoming). Getting Things Done®: Productivity, Self-Management and the Order of Things. submitted to Networked Affect, Ken Hillis, Susanna Paasonen and Michael Petit (eds) MIT Press.
Guyer, Jane. 2012. Percentages and Perchance: Archaic Forms in the 21st Century. Public lecture given at Goldsmiths College, London, February 15.
Guyer, Jane. 2004. Marginal gains: Monetary Transactions in Atlantic Africa. Chicago: University of Chicago Press.
Haraway, Donna. 1991. Simians, Cyborgs, and Women: The Reinvention of Nature. London: Routledge.
Kenner, Alison. 2013. Diagnosing Data: Tracking Asthma Through U.S. Agencies and Beyond. Society for the Social Studies of Science 2013 Annual Meeting.
Kopytoff, Igor. 1986. The Cultural Biography of Things: Commoditization as Process. In Appadurai, Arjun (Ed.). The Social Life of Things: Commodities in Cultural Perspective. Cambridge: Cambridge University Press.
Kragh-Furbo, Mette. 2012. Living Data: Genetic Data Travels to an Online Forum. Society for the Social Studies of Science Annual Meeting, Copenhagen, Denmark.
Lave, Jean. 1988. Cognition in Practice: Mind, Mathematics and Culture in Everyday Life. Cambridge: Cambridge University Press.
Latour, Bruno, and Vincent Lépinay. 2009. The Science of Passionate Interests: An Introduction to Gabriel Tarde's Economic Anthropology. Chicago: Prickly Paradigm Press.
Leahu, Lucian, Steve Schwenk, and Phoebe Sengers. 2008. "Subjective Objectivity: Negotiating Emotional Meaning." In Proceedings of the 7th ACM Conference on Designing Interactive Systems, 425–434. DIS '08. New York, NY, USA: ACM.
Maniatis, Petros, Devdatta Akhawe, Kevin Fall, Elaine Shi, Stephen McCamant, and Dawn Song. 2011. "Do You Know Where Your Data Are? Secure Data Capsules for Deployable Data Protection." In Proc. 13th Usenix Conf. Hot Topic in Operating Systems.
Nafus, Dawn and Jamie Sherman. (In press). This One Does Not Go Up to Eleven: The Quantified Self Movement as Soft Resistance. International Journal of Communication.
Nafus, Dawn and Richard Beckwith (forthcoming). Number in Craft: Situated Numbering Practices in Do-It-Yourself Sensor Systems. In Clare Wilkinson and Alicia De Nicola (eds). Taking Stock: Anthropology, Craft and Artisans in the 21st Century.
Neff, Gina. and Brittany Fiore-Silfvast. 2013. What We Talk About When We Talk about Data: Metrics, Mobilization an Materiality in Performing Digital Health. Theorizing the Web Conference, March 6. Ratto, M. 2007. Ethics of seamless infrastructures: Resources and future directions. International Review of Information Ethics, 8, 12.
Roberts, Julie. 2013. The Visualised Foetus: A Cultural and Political Analysis of Ultrasound Imagery. London: Lund Humphries Publishers. Strathern, Marilyn. 1992. Reproducing the Future: Essays on Anthropology, Kinship, and the New Reproductive Technologies. Manchester: Manchester University Press.
Verran, Helen. 2001. Science and African logic. Chicago: University of Chicago Press.
Wakeford, Nina. 2012. The New Numeracy. Retrieved from https://vimeo.com/56148680.
Wilkinson, Joann. 2012. Matter of Bits: Articulations of Reproduction through Ovulation Technologies. Society for the Social Studies of Science Annual Meeting, Copenhagen, Denmark.

第8章　家庭与社区传感器的使用

在本章中，我们将概述已经由英特尔和独立生活技术研究（TRIL）中心的研究人员成功开发和应用在基于家庭和社区研究实验中的设计、安装、使用、管理和分析的方法。将研究从实验室范围转移到社区诊所和人们的家庭等真实世界的环境中是极具挑战性的。然而，一旦成功，合理使用此研究成果将使患者和医生都大受裨益。借助多学科团队的专业知识对确保在项目周期中发现和解决所有问题至关重要。值得一提的是，无论在开发阶段还是评估阶段，最终用户都应该是关注的核心。最后，实验必须产生经得起临床专家和科学家严格审查的数据和结果，这对于任何想要成功应用于临床的新技术都至关重要。

注：独立生活技术研究（TRIL）中心位于都柏林，是一个由英特尔和来自都柏林大学（UCD）、都柏林三一学院（TCD）、爱尔兰高威国立大学（NUI，Galway）及圣詹姆斯医院的研究队伍组成的大规模合作团队，是一个专注于将技术用于提升在自己选择的地点独立生活的老人的生活水平的研究中心。TRIL 的研究包括识别、理解和准确测量临床数据并应用于预测健康、防止衰老、提升福祉和生活独立性。其主要目标是促进关键临床数据的测量，测试技术支持的临床环境的诊断和非临床环境的干预，并在两种环境中都得到验证。这结合了技术的设计和开发阶段，以人为本，且结合了人类学的研究。本章中出现的诸多见解都是在 TRIL 研究活动中收集的。概述的研究案例均由英特尔和 TRIL 的研究人员合作完成。

更多信息可登录 www. trilcentre. org 查询。

8.1　医疗领域的挑战

日常生活中应用的医学诊疗技术已经广泛应用于步态识别和测量、心血管健康、感知障碍和认知功能等方面。然而，少有技术应用于社区环境中，其原因不乏成本、可用性和需要专业化的设施和/或专业人员等。此外，临床领域长时间监测数据集的价值有待商榷，批评人士正在寻找其对医疗成果、成本和效率影响的证据（Alwan，2009，McManus et al.，2008，Tamura et al.，2011）。尽管单次或短期的测量，如心电图或 24h 动态血压检测已在诊断过程中取得认可，但在以预诊断为导向的技术方面仍发展缓慢。预诊断起源于工程领域，在工程领域，其用于预测系统（或系统内的组件）在规定程度的统计置信度内能否达到预期的性能。当然，人体

是一个复杂的生物系统，使得它因为生理学、生物力学、行为学和认知学的参数之间的微妙作用而难以进行系统建模。因此，我们需要频繁的评估或长期的检测，甚至同时需要这两者，以发展一种技术，能仅在个体的正常范围内就能发现一个明显的趋势。庞大人口的数据集也很关键，它可以将与流行病学特征密切相关的数据分组。可以建立规范的数值或范围，用于区分个体与其他相似个体。这些数据的规模至关重要，因为样本量越大，支持的模型也更精细，而这些模型是有着相同生理、认知和生物力学范围的分组的反映。

在几乎没有临床监督的情况下，以一种可靠、稳定、低成本的方式长时间地收集高质量的传感器数据是一项极具挑战性的任务。为了应对这些挑战，生物医学研究的发展需要新的思想。基于传感器的应用需要更宽阔的视野，研究过程中所有的利益相关者都需要参与其中，而不仅仅是工程博士。临床医生、科学家、生物医学工程师、社会学家、设计师、信息和通信技术（ICT）工程师以及其他人都应该协同工作，促进新型健康管理模式的技术开发、使用和评估，如图 8-1 所示。

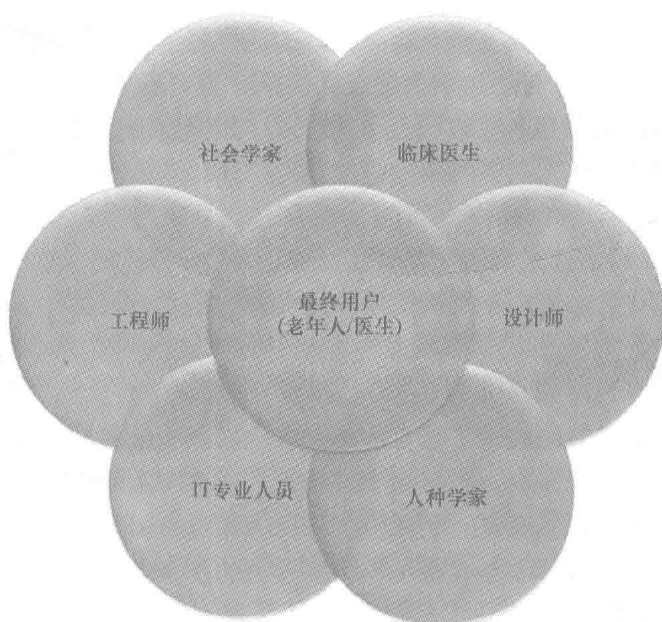


图 8-1　TRIL 跨学科技术研究方法

8.2　研究设计

任何研究的设计和执行都分为多个阶段，如图 8-2 所示。研究步骤应按顺序进行，以最大限度地减少研究设计中的问题，并最大程度地提高研究成果的质量。

1）显然，任何项目的起始阶段都是明确项目研究的问题，在某些项目中还要

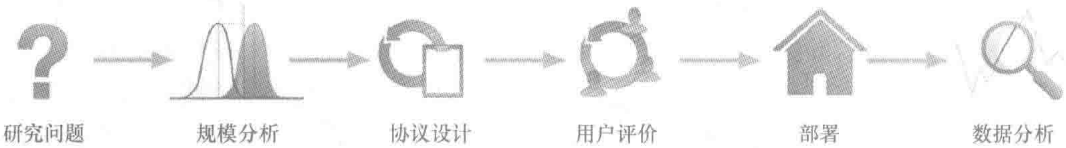


图 8-2 项目生命周期

明确需要解决的技术问题。

2）取得显著成果所需要的参与测试对象的人数在规模分析阶段进行确定。被测试人数对于任何要求具有准确诊断能力的传感器应用都格外重要。

3）协议设计阶段的重点是所要收集的数据。精心设计协议对确保数据的质量至关重要。数据质量可通过观察数据的收集过程（换言之，即有监督的协议）或通过极具稳定性的测量方法来获得，尽管对于大规模的使用，两种方法都可能难以接受。

4）传感器系统的可用性和可接受性在用户评价阶段评定。根据在此阶段收集的信息，可改进系统设计或完全重新设计以使其更易于被最终用户接受。

5）使用阶段侧重于传感器系统的成功安装，其目标是收集能够回答项目研究设计初期提出的问题所必要的数据。在此阶段，还能发现一些在实验室测试过程中未出现的技术问题。使用的同时还能突出在用户评价阶段没有发现或未被优先解决的可用性问题。

6）项目生命周期的最后阶段是数据分析，在这一阶段，第 5 章中所述的许多数据挖掘和可视化技术可用于揭示数据中的有趣规律。

8.2.1 提出研究问题

一个明确的研究问题决定了需要收集哪些数据来验证假设，而这又通过规模分析决定了被测试人数的多少。参与测试人员入选还是淘汰的标准将根据所研究的问题和所需要检测的数据而确定。临床协议将由数据类型和数据收集所需的工作人员来确定。如果要采集血液样本或者参与测试人员的健康易受威胁，则无论按法律还是按伦理都需要有医生在场。可能还需要训练有素的心理医生管理和解释被试人员的心理评估，需要工程师安装和维护技术并在收集数据后进行验证。

根据大部分机构的要求，临床协议应作为伦理审批过程的一部分准确记录在案。在数据收集阶段，协议应随时有据可查且应当严格遵守。该文档在研究的数据分析阶段将是无价的，它提供了数据的背景和解释。

对于临床研究来说，在一个多学科环境中工作是很常见的，理应建立一个临床需求文档（CDR）和一个原型需求文档（PRD）。CRD 是临床医生为记录他们在研究中的需求而制定的。这个文档是对协议文档的补充，具体指定了临床医生为达到研究目标所需要的传感器技术和工作人员。PRD 是一个技术文档，由工程师撰写，

描述他们对硬件和软件的选择。两个文档都由多学科团队成员共同讨论，直到对初始样机的要求达成一致。有时候，通过这些文档会发现一些有必要深究或需要焦点小组关注的问题。虽然撰写和维护 PRD 和 CRD 这一类文档非常耗时，但是它能有效预防跨学科团队间可能出现的对需求的误解。最后，这些结构化的需求明确流程能有效缩短项目总时间，并能最大程度地减少项目评估阶段不同小组间潜在的分歧。

8.2.2 临床群体特征

在所有以健康和保健为主的研究中，一支临床队伍都是重要组成部分。组建这一队伍需要较高的成本和精力。但投资组建这样的团队将有可观的收益，比如他们能帮助工程师分析数据，并在分析过程中发现各个参数间有趣而新颖的关系。

首先要解决的一个问题是确定队伍的人数。规模分析应使用准确可靠的统计分析来确定队伍的理想规模（Cohen，1988）。规模分析用于计算出给定成果所需的最小样本量。进行规模分析能避免被试队伍规模过小或过大。如果样本量太小，则根据此数据得出的研究问题的结论不够准确。如果样本量太大，则太浪费时间和精力。研究能力取决于效应量、样本量和 I 型误差（如 $\alpha = 0.05$，表示错误拒绝原假设为真的概率，也即，当参数之间不存在关系时，错误确认参数之间的关系）。效应量应该能代表具有临床意义的最小影响。正因如此，它会随着测量方法的不同而改变。如果效应量和 α 已知，则样本量大小成为研究能力的函数。通常情况下，统计研究能力大于 80% 被认为是足够的，与 80% 规模相应的样本量被作为最小研究群体大小。考虑到中途退出的情况，招募的研究群体大小应该大于根据研究能力分析计算出的结果。这种缓冲系数取决于队列人口和该研究协议的性质。

如果条件允许，临床群体应进行一次大致的体检，以确定其健康基线，发现一些必须立即处理的风险，并使他们退出此研究项目。大部分的临床研究伦理委员会都有此要求。例如，老龄化严重的被试队伍很可能需要进行跌倒风险评估、认知功能测试和生理测试，以确定其健康的基本情况。

1. 协议选择：有人监督与无人监督

选择有人监督还是无人监督的协议取决于所研究的具体问题。在有人监督的协议下，所有环节均需要临床医生或研究人员在场，并需要记录相关数据，以确保协议得以执行，并保证参与者的安全。出于这些原因，有人监督的协议通常适用于传感器数据的质量至关重要的实验中。然而，实际上，当传感器长时间工作时，即使我们对其感兴趣，有人监督研究方法也并不实用。让一个参与者连续几个月每天都到医院或实验室十分不便；同样的，在研究期间让一个研究人员每天都去参与者的家里也十分不便。因此，无人监督协议是一个更好的选择。在无人监督研究过程

中，远程传感器管理、数据管理和数据格式等问题十分重要。远程管理工具可用于检测采集的数据（参见 8.4 节）。它们帮助研究人员在实验过程中检测数据质量、协议执行情况、设备状态等。如果数据未用远程管理基础结构监测，则如 8.8.3 节所述，参与者需要每天填写研究日志，以提供传感器采集数据的背景。

2. 临床意义

新技术解决方案有时候会比“正常治疗”更费时，成本也更高。但是如果能证明使用传感器技术有临床应用前景，那么财务和时间上的成本是可以抵消的。新技术是现有临床解决方案的一个更低成本、更便携的版本，它能利用现有的对临床设备的研究而超越这些临床设备。有些人已经通过现有的临床设备采集、运用和解读数据并有丰富经验，这种传感器将很快被他们所接受。

如果某项技术在临床上没有相似等效的技术，则论证该技术的要求较高。首先，新技术必须与“正常治疗”纵向比较经济效益和人体健康的优劣，如进行随机控制实验（RCT）。其次，研究结果必须发表在国际公认的临床期刊上，并经过国际同行评审。最后，新技术/评估必须比现有的方法，即比有数据解读经验的社区医生有更高的数据解读能力。这一数据解读能力必须由新技术或额外的培训提供。

8.3 家庭使用传感器

适用于家庭或小型社区环境的传感器系统的发展面临着诸多严峻的挑战，包括成本、可靠性、是否便于安装以及美观方面的考虑等。这些因素的相对权值因应用场景不同而不同。在本节中，我们将主要关注应用于穿戴式或周围环境敏感的传感技术解决方案。

8.3.1 家用与社区使用的传感技术

低成本、高可靠度、直观的技术可用性对实现基于家庭和社区的解决方案至关重要。尽管这些技术可能并不具备医院中常见系统的超高分辨率，但它们在社区诊所中就能提醒医生，患者是否存在某种疾病或患者是否表现异常需要转移到更专业的医疗机构接受进一步检查。

大部分老年医学或用药主要凭借对患者的主观诊断或借助于极大依赖主观判断的工具进行诊断。将对患者的观察与测试结果相结合并得出结论，这一能力需要多年的专业临床经验。即使临床医生有准确评估患者病情的能力，也没有全面定量的测试记录。这会影响医生准确追踪预设的治疗是否在起作用的能力。传感器系统为医生提供了测试过程中完整记录所有可用数据的工具。客观的测量使得测试有了可重复性和可再现性，这在长期病理监护中十分重要。

传感器可以在患者客观划算的测量中发挥重要作用。新型临床传感器技术将使

公共卫生政策从被动治疗向主动保健转型。这些解决方案必须经过传感器数据处理，将数据以一种直观的方式展示出来，指出患者的数据与类似人群是否有差异及有何差异，同时还要能够允许医生将结果与先前的测试结果作比较。总的来说，这些因素可以为本地的医疗卫生工作者提供专业医院中的专科医师才具备的能力。因此，患者的治疗费用会大大降低。早期的干预和主动治疗的费用往往比出现健康问题后的被动治疗低得多。

目前基于传感器的方法主要分为两大类：

- 穿戴式的应用目前主要用于评估和/或监测。
- 周围环境监测的典型应用是被动监测对象的行为和活动模式或触发执行器以执行某个动作，比如夜间起床，当床边的传感器被触发则打开电灯。

虽然两种方法都可以用普通的技术元件，但它们的设计有不同的考虑和限制，如与人体的接触、长期地工作、数据处理能力要求等。

8.3.2　穿戴式传感器的评估应用

穿戴式传感器（BWS）已经在各种生理和运动监测中广泛应用（Catherwood et al.，2010，Ghasemzadeh et al.，2010，Aziz et al.，2006，Greene et al.，2010）。BWS 可以通过客观的测试方法帮助社区医生做临床判断，而目前这些测试主要是定性的。由于 BWS 的小尺寸，它们能够进行长时间的体表检测。它们还可以支持灵活的协议。用于数据转发的 BWS 可以将数据发送到距离 100m 外的数据聚合器上。用于数据记录的 BWS 能将数据记录在本地存储空间中，因此允许独立的监测（Scanaill et al，2006）。然而，体表传感器的固定方式的设计极其重要。用于获取数据的传感器必须确保所收集的数据有足够的分辨率，以防止运动噪声被引入信号中。传感器安装固定的方式也应该尽量直观，防止传感器在体表定位或传感器方向的错误。因为这些相互关联的要求，传感器系统是确保完整的端到端的最有效的方法（见第 3 章）。

对于需要长期监测的应用，合规性将是一大难点。如果患者夜间睡觉时、洗澡时、充电时将传感器取下，则必须记得重新戴上传感器。在生理传感应用中，电极必须设计得尽量减小对皮肤的刺激并确保信号质量良好。鉴于这些考虑，穿戴式传感器必须与应用完全匹配。短期测量是 BWS 很好的应用场景，如 24h 心电图监测或用于诊断的一次性测量。这些应用有专业医疗人士以某种方式督导，以确保传感器正确安装固定，数据质量符合要求。

许多研究团队越来越多地将运动传感器用于运动分析应用中，这得益于传感器的小尺寸对于测试对象的步态模式并没有太多影响。它们也可以通过将数据存储在本地记忆卡中来进行独立的监测。步态与平衡障碍是导致跌倒最普遍的危险因素之一，它可以通过使用低成本的运动传感器（即加速度计、陀螺仪或磁力计）精确测量。然而尽管它们价格低廉，却极少使用在研究或临床以外的环境中。这主要有

以下几个原因：第一，许多现存的技术并没有为它们产生的结果提供充分的背景环境，因此需要专业知识来解释；第二，社区医院没有时间组建这些技术并执行复杂的协议，而且这些协议甚至还需要进行例行检查。最后，这些技术的发展和销售并不面向社区医生。因此，大多数医生并不知道这种技术的存在。8.8.1 节描述了一种根据以上考虑设计与开发的穿戴式运动传感应用。

8.3.3 周围环境监测传感技术

环境监测传感系统通过连接各种传感技术（如将主动式或被动式红外传感器连接至数据聚合器）对患者提供 24h 不间断监测。数据聚合器可以对数据进行简单的存储用于离线分析，也可以将数据发送到后端的设备。数据一发送到后端就可以根据应用进行特定的分析。例如，在日常生活活动（ADL）中，基于监测对象与他们的家庭环境中的相互作用，数据可以用于推理机（如贝叶斯和马尔科夫模型）监测辨别他们的日常生活活动。或者，数据可用于识别他们日常行为的变化，这也许可以作为疾病发作的判据。例如，可以通过发现夜间上厕所变得更频繁而诊断出糖尿病；老年痴呆症可以通过日间或夜间越来越不稳定的运动状态诊断出。以下还有一些非接触式解决方案：

- 日常生活活动（Wood et al.，2008）。
- 安全（Lee et al.，2008）。
- 位置确定（Kelly et al.，2008）。
- 步行速度（Hagler et al.，2010，Hayes et al.，2009）。
- 认知与老年痴呆（Biswas et al.，2010）。

环境监测传感器也可以为执行器或其他形式的集成系统提供输入。压力传感器可以在某人离开他的床旁时检测到这一动作，然后触发一个执行程序，如点亮去卫生间路上的电灯，以防止意外跌倒。

从用户的角度看，环境监测传感器可以使人产生不同的反应。一方面，这些系统能让人们产生安全感，尤其是那些独居的人。然而如果某些人把传感器当成了监控摄像头，它们也会让人产生强烈的消极反应。好的外形设计可以使传感器不太显眼，能减少人们意识到它们存在的次数。自带电池的传感器安装灵活，可以放在不显眼的地方，不像需要供电的传感器，需要放在电源插座附近。

8.3.4 用户设备入口

用户设备入口在监测与评估工具的设计和使用中的作用越来越重要，因为如今的解决方案已经不再局限于大型 PC 或笔记本电脑。在包括医疗健康领域在内的诸多领域中，智能手机和平板电脑不断增长的处理能力得到越来越多的青睐和开发（Middleton，2010）。超过 80% 的医生表示正在使用移动设备，如智能手机和平板电脑，来提升对患者的护理水平（Bresnick，2012）。以更低的成本获取更多的利

益，未来需要利用这些低成本设备的性能。然而，主要的精力还是应该放在合理设计用户界面上，以确保在小尺寸的屏幕上应用程序的使用也能很高效。医生和医学院学生已经开始使用智能手机管理电子邮件，获取在线资源和查看医疗文献。但是对于临床应用，比如查看实验室结果或仪器测试结果，如心电图和电子处方，则可用性明显较低。即使不考虑智能手机的检测、处理和数据存储能力，其临床应用也还远不及临床数据采集/评估设备那样普及。

智能手机和平板电脑具有用户交互直观、集成传感、低功耗处理、数据采集和存储成本低以及无线连接等特性。智能手机的另一个主要优点是可以通过从在线应用商店下载软件或使用开发者提供的软件开发工具包（SDK）创建应用程序来扩展设备的功能。

平板电脑的外形决定了其自然和直观的人机交互模式，十分适合老年人和某些身体不便或有认知障碍的人（Smith，2011）。使用平板电脑并不需要训练。专为老年人开发的应用已在最近的一些文献中报道，如辅助回忆的应用（Mulvenna et al.，2011）、语言翻译的应用（Schmeier et al.，2011）和寻找厕所的应用（Schmeier et al.，2011）等。开发者应该充分重视应用交互模式的设计。如果应用的导航和交互不够简单，则设备交互操作的便利性带来的好处会被忽略不计。

平板电脑与用户的交互简单、位置独立、屏幕尺寸大，受益于此，平板电脑的一个热门应用是认知功能测试。某些认知功能测试只是简单地要求被测试者用纸和笔还原先前显示的图案。将这项测试照搬到标准笔记本电脑或台式机等计算设备上可能会面临严峻的易用性挑战。人们很难把通过这项测试的能力与高效使用笔记本电脑/台式机的能力区分开。将测试建立在平板电脑上可以解决易用性的问题，并允许被测试者可以在他们更喜欢的地方接受测试。平板电脑上的集成传感器也能用于提升易用性。例如平板电脑内置的光线传感器通过检测外界光线强弱自动调节屏幕亮度，并始终保持屏幕的可视性一致。

大多数智能手机都自带惯性传感器，包括加速度计和陀螺仪。这种一体化运动检测能力的普及促进了智能手机在生物计量检测、动作检测和运动分析方面应用的发展。然而在平板电脑和智能手机中使用集成传感器也有一些限制，尤其是要求采样率一致的应用。智能手机等设备并不能保证一致的采样率和传感器的灵敏度。在这些参数的控制至关重要的应用中，设计时使用独立传感器比集成传感器更合适。8.8.1 节描述了一个基于 Android 系统的穿戴式传感器应用的发展。独立的传感器控制中心，独立于手机内的 CPU，解决了许多目前已知的性能限制的问题。

电视机在近几年作为潜在的医疗用户设备入口而受到关注。商业化的生活辅助产品，如飞利浦公司的 Motiva（Philips，2013）专注于慢性疾病管理（CDM）。直到现在，CDM 的解决方案仍然要求将机顶盒连接到电视机上。现在，具有联网功能的电视机出现，三星、LG、索尼和松下等制造商已经开始量产，这些电视机拥有集成 CPU 和网络连接功能，它们为未来医疗内容消费提供了一个新的平台。与

健康相关的设备连接到云端，数据和其他分析得到的信息能够通过“智能电视机”的网络界面被消费。然而，要让这个平台足够成熟，成为一个可行的健康平台还需要很多年（Blackburn et al.，2011）。虽然这一平台的用户体验正在提升，但远未达到无缝体验的水平，提供高质量的用户交互体验仍然面临严峻挑战。

8.3.5 用户反馈

将反馈提供给最终用户会产生一些有趣的问题和矛盾，尤其是当技术的使用主要是以研究为导向的时候。实验参与者通常需要关于自己的表现和所获得的结果的反馈，并会问这样的问题：“这是不是说明我做得很好？”反馈以及将其传递给参与者的方式对维持用户的粘性有较大帮助。但是，提供反馈的积极影响必须由潜在的研究过程中获取数据带来的消极影响抵消。接受反馈的用户很可能过度使用技术或改变参与实验的方式，从而得到更高的分数，并导致数据产生偏差。最终，是否提供反馈以及反馈的类型都将根据研究的问题而定。

8.4 家用传感器的管理

家用传感器技术主要有两大开销。首先，上门服务意味着在参与者家中安装、维护和拆卸等所要求的时间和资源。为最小化上门服务的时间并确保参与者乐于接受此技术，必须发展一个明确规定的流程。该流程文档必须持续更新以跟上最新的发展。其次，传感器远程管理的能力是一个成功使用的关键要求（见图 8-3）。这包括确保数据都是根据实验方案规定所收集的，并以安全可靠的方式传输和管理。同时，要求能够远程调试和更新传感器和所有相关的技术。远程管理工具使得使用以一种有效和积极的方式进行。在问题出现的早期自动检测识别，从而最小化潜在的数据丢失。系统设计应允许短时间的远程连接中断，提供本地数据缓存直至连接恢复。

最后，远程管理工具应具有数据质量检查的功能。接收到的数据包或数据文件先经过自动化的程序检查其有效性，然后才能提交到中央数据存储库。这些程序通常以脚本的形式存在，能够检查文件或包中是否有数据丢失、空数据或异常值等错误。

远程管理计算机设备是企业环境中的标准做法，它能显著地提高运营效率并降低成本。家庭和社区技术使用的异质性使得提供此类型的功能比在可控的、同质的企业环境更困难。然而，如果能正确理解所涉及的问题并不断发展，挑战各种假设，那么现有的许多在企业环境中可用的技术能成功地改进并应用到这一领域。

现在已经有许多关于传感器数据管理框架的报道。这些框架为管理网络的各个方面而提出，如数据精确度（Ganeriwal et al.，2008）、数据协同（Melodia et al.，2005）和数据查询（Li et al.，2008）等。但是，这些研究主要集中在第一级（传

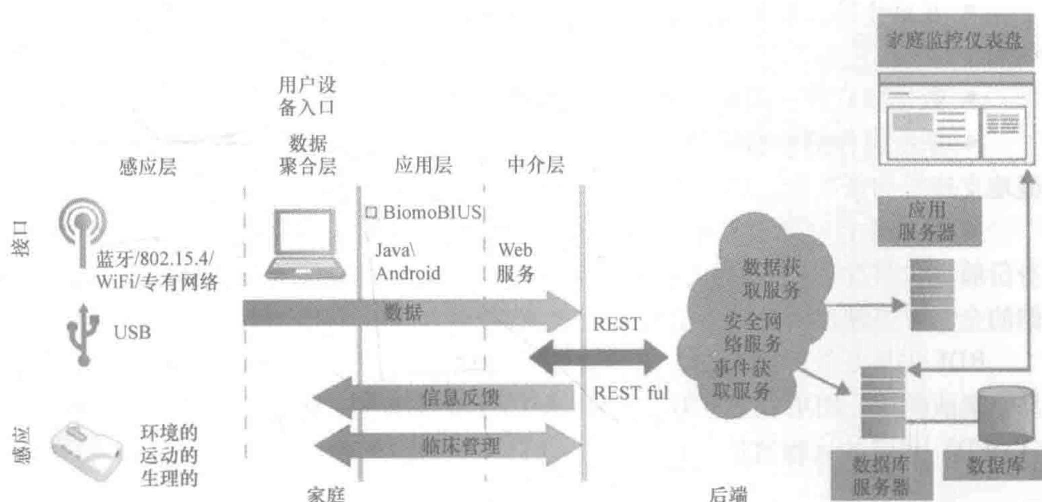


图 8-3 家庭使用数据和客户管理系统架构

感器）和第二级（数据聚合器），却鲜有注重数据外部传输的研究。Balazinska 认为传感器网络研究人员对封闭式传感器网络研究过多，而对管理、分析和理解数据的工具的研究不足。

传感器网络的远程数据传输通常需要定制化的管理框架，因此需要较长的发展时间、较高的成本和支持费用。这些框架通常不直接提供管理工具支持数据聚合器的远程管理、后端管理报告以及异常的配置与管理。Xively（xively. com）和 iDigi（www. idigi. com）等在线工具允许用户远程管理他们的传感器，它们很可能被证明是有显著意义的。

8.5 远程使用传感器结构

远程使用传感器结构（RDF）（McGrath et al. , 2011）是 TRIL 研究人员为了解决这些问题，基于他们在远程传感器技术使用过程中积累的经验教训而所做的一次努力。RDF 的主要功能是提供一个以安全稳定的方式收集、传输和保存数据的通用框架（Walsh et al. , 2011）。RDF 有一个以服务为核心的架构，使用 Java 企业技术。该框架支持从远程使用的传感器中安全有序地收集数据并通过不同的数据聚合器集中到一起。RDF 还提供了一整套工具管理所有家庭使用，包括远程客户端监测、数据监测、远程客户端连接以及异常通知管理。

RDF 的实现基于五个关键的家庭使用管理框架要求：

- 平台独立性：框架应该能够在多种硬件平台和操作系统上运行，包括 Windows 和 Linux。可编程接口应该支持 C/C + + 、. NET、Java 和脚本语言。这能保证传感器系统架构师拥有广泛的设计选择。

• 互操作性：框架支持开放标准（如 WS-I），以确保未来的兼容性、集成性和安全性。

• 数据独立性：RDF 与数据相互独立，数据模型支持多种使用模式。

• 系统可伸缩性和可扩展性：框架支持可变的传感器节点数和数据量，并无缝地支持添加新功能。单个 RDF 应支持多个传感器实验。

• 安全性：框架必须在传输层和应用层都支持数据的保密，也应该提供多种身份验证/授权机制，还需要有安全审核追踪机制，以确保从传感器节点到数据存储的全程可追溯性以及随后的数据检索。

RDF 倡导开放标准理念，支持使用非专利技术，保证了第三方和研究合作者易于集成使用。RDF 已被 TRIL 应用于周围环境监测、家庭监测与慢性阻塞性肺病（COPD）患者的远程监护。

8.6 样机设计过程

在 TRIL，人类学家在最终用户的家中和社区中花了很长时间，以了解他们的生活和经历。现场考察所收集的信息经过提取后提交给多学科团队以促进发展理念，并使他们了解研究样机的发展。这些头脑风暴通常由设计师和/或人类学家，以及临床研究人员、工程师和科研人员等团队主导。这些会议上提出的最好的概念会使用情节串连和低保真模型等设计工具进一步研究，然后才会被送到在焦点小组中的潜在最终用户。焦点小组再反馈给多学科团队，其反馈会用于进一步改善概念。这一改善和反馈的循环会重复多次，使样机日益复杂，直到最终的样机能被开发使用到家庭或社区中。

设计的流程依赖于对用户和他们所处环境的理解，并根据这一点以及多学科利益相关者的共识发展合适的技术从而达到目的。

8.6.1 与用户共同设计

深入了解最终用户对于发展他们将使用和交互的技术至关重要。他们的身体和认知的能力/局限、他们的日常生活、他们对于相关技术的使用经历都要做了解。在调查了解最终用户的过程中，必须认识到，每一个用户都不尽相同。因此，目标人群中的每个人都要做详尽的调查，他们所属的更大的人群也应该做广泛的调查。图 8-4 是为确认设计选项和可用性而让目标用户交互测试所得结果的一个例子。

不幸的是，一些设计师和工程师对他们的目标用户的独特需求知之甚少。例如，早期的胰岛素笔只有一块很小的液晶显示屏（LCD），使得糖尿病患者很难看清（Burton et al.，2006）。产品设计师没有考虑到糖尿病患者往往视力不佳。结果就是，这些设备的早期版本不得不花大笔经费重新设计，使产品配备的显示屏尺寸更大，对比度更高，更易于糖尿病患者阅读。因此，做人类学研究和鼓励最终用户

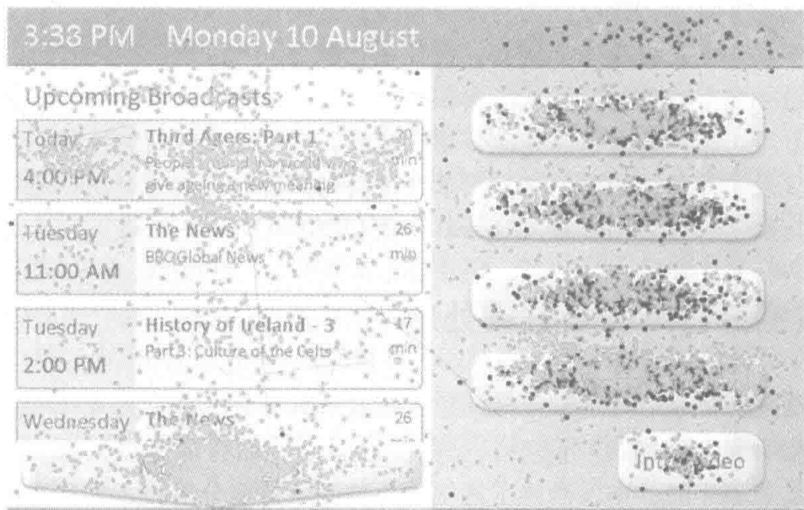


图 8-4　所有用户日志记录的测试者使用触摸屏菜单能力的可视化图形

参与到设计过程中来都是了解最终用户非常必要的策略。在 TRIL，所有专为老年人开发的技术项目都会有一个让老年人反复参与“共同设计”的过程。以此种方式设计的技术使得最终可用的可能性大大提高，并使其长期可以满足特定需求。

与没有技术基础的最终用户共同设计技术也存在一些挑战。这些最终用户很难理解新技术可能带来的好处。这会限制他们的能力以及参与到技术需求讨论中的积极性。我们发现在焦点小组中使用情节串连或场景模拟能够将对技术本身的关注转移到技术对个人所能带来的好处上，从而解决这一问题。这些技巧有助于参与者之间的公开讨论，并最终帮助设计团队找到技术的主要功能。我们还发现，使用户严谨对待他们的反馈很有必要。人类学家能轻易看出用户的反馈是过于积极、过于肤浅还是十分恰当。

8.6.2　与多学科团队成员共同设计

评估和干预技术的宗旨是它们是否满足临床需求，无论是身体的、社会的还是意识的。不能为了技术而发展技术。因此，设计过程必须从医疗卫生专业人员开始，先确定临床需求。例如，在 8.8.1 节中，设计过程开始于一位老年医学专家，他在老年人跌倒方面有丰富的专业知识，他概述了项目的预期成果。随后，在一系列的研讨会上，这些预期结果被多学科团队的成员转化为设计和工程要求。

在多学科团队中，每个团队成员都把自己的专业知识和经验带到了项目中。科学家通常要确保研究的科学严谨性和完整性。人类学研究人员要确保解决方案可行并能融入最终用户的生活中。工程师和设计师会确定和开发能够解决研究问题的技术。当一个多学科团队在一起开展和完成的项目越来越多，他们的角色会渐变和重叠。重叠可以带来一定的好处，因为团队成员会有信心在更多领域提出反馈意见，

而不仅仅只是在自己的领域。当然多学科团队之间也经常会有分歧，因为不同的团队成员有不同的优先级考虑。例如，最先进的技术可能并不一定是最适合用户的，研究的问题不能单单通过技术就能解决，或者提出的协议对于用户来说太过严苛。为了解决分歧，用户的需求总是放在第一位的。优先使用先进技术的解决方案或者研究的协议过于严苛，超出了用户需求，都会有风险。反过来，这些都会影响研究过程中采集数据的数量和质量（Bailey et al.，2011）。

8.7 数据分析与智能数据处理

对数据进行检查、处理和建模的过程以发现具有临床意义的规律和关系，这对于所有临床研究实验的成功都至关重要。数据分析和智能数据处理（见第5章）的研究是复杂多样的。本节概述了常用的生物医学数据分析技术。

如第5章所述，数据处理的一个关键步骤是去除噪声和由于运动和电子设备造成的误差。数据应经过滤波，去除信号中有效带宽以外的频率分量。例如，在步态分析中，我们所感兴趣的运动数据的频率通常在100Hz以下。数据应经过低通滤波以去除高频噪声的影响。类似的，当我们要观察肌电图（EMG）等生理数据时，由于其有效频率一般在20~450Hz，因此数据应经过带通滤波，去除低频运动伪影和高频噪声。

为了解释临床数据，提取相关特征值十分必要。这些特征值依赖于数据类型和其收集时所遵守的协议。通常，计算得到的特征值要具有临床意义。例如，在步态分析中，所确定的特征值可能与步态时间、步幅或者跨步时左右腿之间的协调有关联。在肌电图中，可以检测功率谱的中值频率以观察实验过程中的肌肉疲劳度。在心电图中，可以监测每一次心跳Q波、R波和S波的变化，从而了解心率的变化。

相对简单的统计技术可以用于研究同一群体中不同子类别之间的某个特征差异。例如，你可能对男性与女性之间、老人与年轻人之间或者健康人与患者之间的差别感兴趣。简单的T-检验、方差分析或秩和检验都可以用于这类研究。

另外，如果研究的目的是把参与者分类，那么对一系列特征值使用回归分析和判别分析更合理。如果因变量是数字（如年龄），那么最合理的方法是线性和非线性回归分析。而如果因变量是类别（如性别），则可以根据预测特征值的特点用逻辑回归分析或判别分析。如果特征值数量较多，则有必要减少其数量，以避免过拟合，并使模型更稳定，足以概括未知的数据。这可以通过使用特征值提取和特征值选择实现。特征值提取方法，如主成分分析（PCA），将一串特征值转化为几个不相关的特征值，而它们所包含的信息尽可能与原数据一致。特征值选择方法，如前向特征选择，依次增加特征值，并在每一步测试模型的性能，直到模型的性能不再进一步提高。模型的性能应用交叉验证测试其鲁棒性。一个常用的方法是K折交叉验证（Kohavi，1995，Han et al.，2000），用此方法时，数据被分为K个子样本，

模型被 $K-1$ 个子样本训练，其性能用剩下的一个子样本测试，该过程重复 K 次，每次用一个不同的子样本测试。

机器学习技术可分为三类：有监督、无监督和强化学习。上一段说的主要是有监督学习，其中的每个特征值和因变量都是已知的。这种方法已经有一些基于临床和传感器衍生的特征值在生理、认知和心理疾病方面的应用。无监督学习的目的是用聚类等一系列方法从大量未知数据中提取出隐藏的趋势和预测信息。从医学图像处理，到基因图谱，再到人口分析都有无监督学习的应用。在强化学习中，将反馈输入到分类模型中来判断某个决定是否正确，同时用此反馈来训练此模型。

最终，用许多不同的方法会得到有意义的临床结果，而你的选择应该根据研究结果客观地决定。必须谨慎根据因变量以及预测特征值的特点选择分析一个数据集所用的方法，并且要考虑研究的目的。如果选对了最合适的方法，你会得到最科学有效且临床相关的结果。

8.8　案例研究

最近几年，TRIL 中心已经将多个技术平台推广到了成百上千个家庭中。在这里，我们介绍三个代表性的案例，具体展示前面所述传感器技术的应用。这些案例中基于传感器的应用既有用于评估的，也有用于干预的。

8.8.1　案例一：量化计时起走（QTUG）测试

标准计时起走（TUG）测试是临床上评估基本活动能力快速和常用的方法。该测试要求测试对象从椅子上站起，前进 3m，转身，回到座位并坐下，整个过程在确保安全的情况下动作尽量快。该测试对测试对象的步态和平衡控制等多方面有要求，但是只有一个衡量标准，即完成测试的时间。阈值时间可以在 10 ~ 30s 内变化以区分测试对象是否是易跌倒人群（Beauchet et al.，2011）。例如，在美国，疾病控制和预防中心（CDC）认为测试时间超过 12s 的人跌倒的风险更高。TRIL 研究人员致力于利用 TUG 测试过程中测试对象佩戴的穿戴式运动传感器获取的数据，以此开发出一套能够量化跌倒风险的临床工具，如图 8-5 所示。这种新的测试被称为量化计时起走（QTUG）测试。

最开始时，研究人员在 PC 上开发了一个应用程序，用于收集患者完成 TUG 测试时的传感器数据。该数据用于开发能够从运动信号中提取出有用特征值的算法。该算法能产生多个特征值（超过 45 个），如步态时间等，这些特征值可用于建立统计模型，提供为期两年的跌倒风险预测。

1. 算法开发

QTUG 样机开发的早期是在 Matlab 上的自适应阈值算法，用于可靠地找出穿戴式运动传感器（固定在左右小腿胫前）得到的数据流中最初和最后的接触点数据

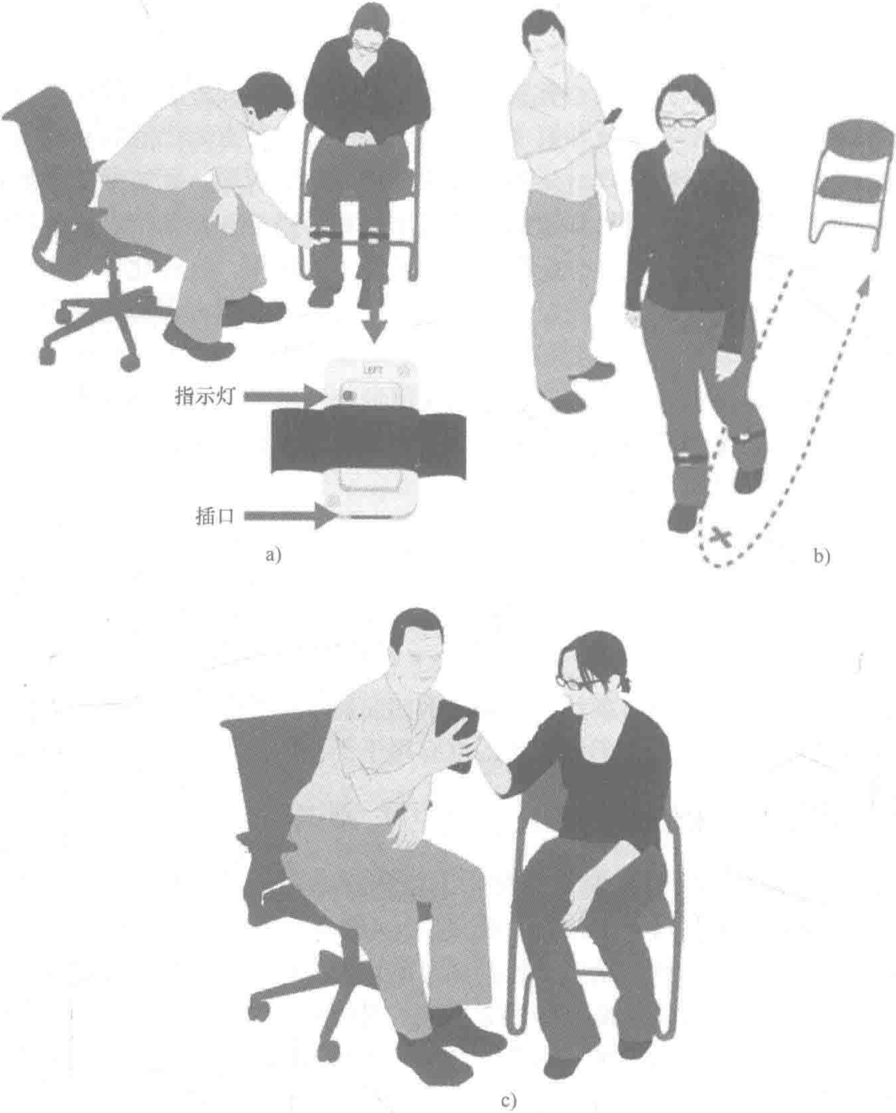


图 8-5　QTUG 测试

a）将运动传感器固定在小腿胫前　b）进行 QTUG 测试　c）在 Android 平板电脑上查看跌倒风险

（即脚跟落地和脚尖离地），如图 8-6 所示。

开发的算法被用于确定步态周期的以下参数：

- 步态时间参数。
- 步态空间参数。
- 转身参数。
- 三轴角速度参数。

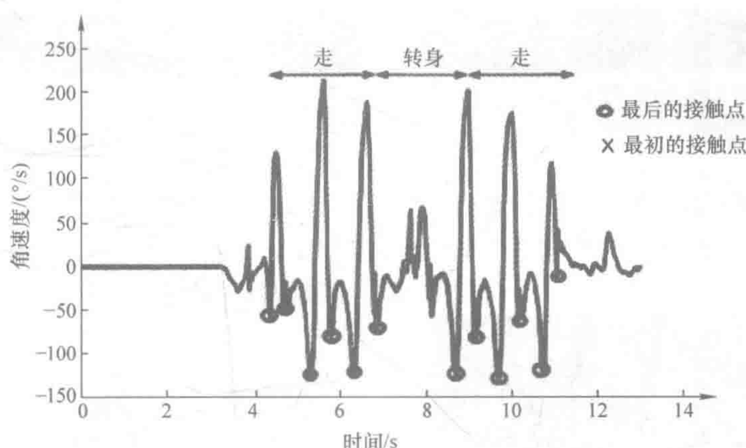


图 8-6　穿戴式传感器采集的基于陀螺仪的步态模式

2. 模型开发

随后，数据根据性别和年龄被分为三个组：男性、年龄低于 75 岁的女性和年龄高于 75 岁的女性。用顺序前向特征选择与正则化判别分类模型相结合的方法可以产生三个预测分类模型（男性、年龄低于 75 岁的女性和年龄高于 75 岁的女性），分别预测老年人未来跌倒的风险。用网格搜索分别确定三个分类模型的最佳特征值集。

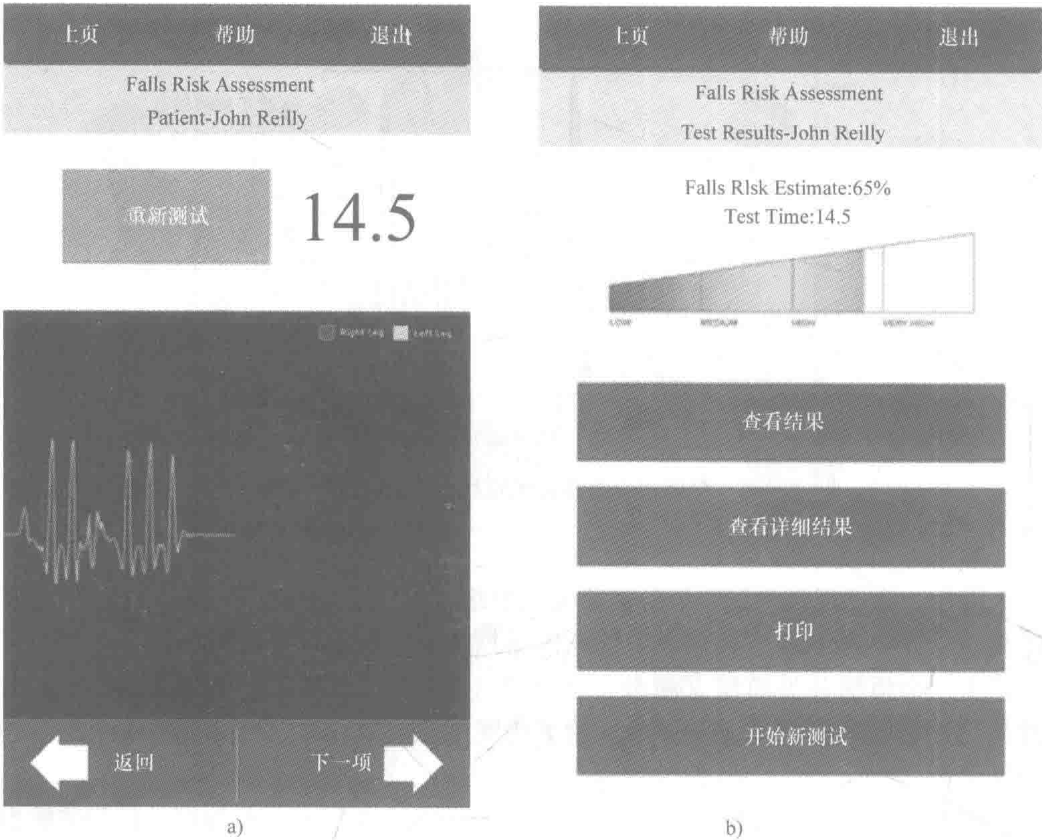
模型都用十折交叉验证法验证以达到统计意义上的无偏估计性能。模型的输出是每个患者跌倒的可能性。开发的模型用基于 TRIL 诊所五年多以来收集的跌倒记录交叉选择研究验证，其样本量如下：$N=239$（其中男性 103 位，女性 246 位），平均年龄 72.4 ±7.4。其中 207 人有过跌倒经历（Greene et al.，2010）。另外，利用诊所收集的数据（两年内跌倒的随访数据）还在进行一项有前景的研究。其样本量如下：$N=226$，平均年龄 71.5 ±6.7，164 位女性，83 人跌倒。通过交叉验证得到的结果表明，判断参与者在随访期间是否会跌倒的准确性达到了 79.69%（95% 置信区间：77.09% ~82.34%）。这个结果的准确性远高于用两种跌倒风险标准测试（手动计时的 TUG 和 Beg 平衡得分（Bogle et al.，1996），这两者的平均准确性分别为 59.43%（95% 置信区间：58.07% ~60.84%）和 64.30%（62.56% ~66.09%）（Greene et al.，2012））。

3. 样机开发

随后，将算法和统计模型转换为一个 Android 应用程序，在一个 7in[㊀] 平板上运行。该应用程序界面直观，使用简便，引导用户依次进行 QTUG 测试的每一步。

可穿戴运动传感器的数据通过蓝牙连接传输到 Android 平板电脑上并显示在屏幕上（见图 8-7a）。接收到的数据再通过算法和模型计算测试对象跌倒的风险（见图 8-7b）。

㊀ 1in =0.0254m。——译者注



a)　　　　b)

图 8-7　QTUG 样机示例屏幕

a）TUG 测试过程中固定在左右小腿胫前的传感器陀螺仪实时信号　b）测试对象跌倒风险的图形显示

在整个样机设计和评估阶段，人类学研究人员与各种临床专业人士开展焦点小组讨论，收集反馈。焦点小组发现，跌倒风险方面的临床专家更喜欢一种能提供所有参数细节的工具，以便他们将这些数据与其他评估方法的数据相结合，并根据他们的专业知识确定测试对象的跌倒风险。因此，该应用程序被修改为能为用户提供更详细的数据，可用于解释跌倒风险的根本原因。而社区工作人员更喜欢一种能直接为他们解释数据的工具。这个反馈后来被采纳并加入到样机中，能为社区工作者提供一个基于百分比的分数，同时增加一个选项，使临床医生能查看所有详细信息。

此样机展示了一种操作简单、携带方便、成本较低的跌倒风险评估工具。临床焦点小组的研究结果表明，由于该样机使用的简易性和展示的直观性，它能成为社区内跌倒风险筛选的依据。QTUG 样机展示了如何通过技术的使用增加一个标准临床测试的可靠性以及如何将以用户为中心的设计应用于开发适用于社区的技术（Greene et al.，2010）。QTUG 样机的成功促使了一个 TRIL 初创公司的成立，该公司致力于将此项技术推向市场。

8.8.2　案例二：日常活动和步态速度的环境监测评估

步态速度很早以前就被认为与跌倒有关，许多研究表明跌倒者的步行速度往往比正常人慢。然而，步态速度是在跌倒后几天，几周，甚至几个月后在诊所记录的。很难确定这个速度与跌倒发生前患者走路的速度一致还是发生跌倒后患者进行了调整的新速度。本案例的研究目的是确定步态速度的变化是否先于跌倒发生。如果是，那么这个速度变化能否预测跌倒风险的增加？

进行日常的速度测量是这个项目的关键要求；因此，研究团队选择了一个在家庭环境中的感测方法，以确保能长期满足要求。研究团队利用无线红外传感器和互联网的数据聚合开发了一套家庭监测系统（见图 8-8）。首先，在家中搭建了一条测速线路，测量走过固定距离所花的时间。随后，将传感器安装在路线中的多道门上，测量人经过门所需的时间。红外传感器的测速原理是测量人刚被检测到和最后一次被检测到的时间差。传感器通过 802.15.14 无线电将数据传输到笔记本电脑上，笔记本电脑再将数据转发到远程服务器上。服务器收集了八位（一位男性，七位女性）老年人（年龄从 67～87 岁不等），平均每人进行了 36 天的测试。每天记录的健康状况与步态速度之间并没有发现显著的相关性。但如果实验时间更长，参与家庭更多，可能会发现一些相关性。



图 8-8　用于家中测量步态速度的等间距壁挂式红外传感器

任何评估的环境都很关键。红外传感器并不能区分不同的人，考虑到这点对于实验的设计和实验数据的分析十分重要。研究人员采用了各种策略来解决这些问题，包括只招收独居的老人作为测试对象，绘制测试对象的室内地图以及室内行走的路线图，要求测试对象每天记录身体状态和是否有访客等。

在无人看管的周围环境中使用传感技术，即便是短期使用，也需要谨慎规划，做好准备工作，并需要使用团队的维护。同时还有一个很高的要求：参与者必须在预使用、安装和拆卸时都在场，还要求他们完成每日记录。高开销导致在给定时间内完成十个家庭的使用难上加难，对参与者的高要求导致他们难以接受八周以上的实验时间。为克服研究中的这些困难，研究人员抓住了需要改进的关键点，并在后

期的家庭使用中成功应用。将数据上传至远程服务器使得家庭使用团队能够对传感器和数据进行24h故障检测。远程控制将日志聚合入家庭中的数据聚合器能够显著减少在家中排除故障的时间。最后，通过参与者资料手册能让他们了解研究的目标、对他们的要求、家庭使用团队的成员等（Walsh et al.，2011）。由于在家中使用环境监控系统的高成本与高难度，研究人员开始关注利用其他数据来源提供智能周围环境监控。研究人员一直在积极寻找利用能够监测电能的智能电表或其他设施，在不额外安装使用传感器的情况下，即能提供深入了解人们的日常生活的数据（见第9章）。

无论是用户安装在家中的传感器、智能电表还是其他形式的数据，周围环境监控应用都会产生道德、隐私和安全方面的问题。在创新性的技术应用之前，要有明确的法律规范，使得数据及其获取有法可依。

8.8.3 案例三：专注生活训练

警觉性：专注生活训练项目致力于提升我们日常生活中对警觉性和注意力的概念和重要性的认识。该项目是一个为期四周，在家中进行的自我管理式训练项目，训练老年人控制调整自己的警觉性。该项目由老年人在设计过程中不断参与改善。研究初期，研究人员将现有的低成本临床技术使用到老年人家中。在此之前，研究人员教了用户一些报警技巧，并教会他们在临床环境下使用该技术。该技术包含一台笔记本电脑和一个手持式皮肤电反应（GSR）传感器，通过笔记本电脑屏幕上的图像给用户提供反馈。该方法的人类学调查发现使用笔记本电脑及看懂屏幕上的图片对于一些用户有难度，而且他们只在有此技术时使用教给他们的技巧。这些发现表明，提高日常警觉性的项目目标并未达到。

随后，研究人员升级了该系统，他们向用户寄了一个警觉性训练工具包，里面包括生物反馈装置、音频CD以及指导书，该指导书提供警觉性的知识、常见问题解答以及自我报警技术指导（见图8-9）。收到工具包后，用户就被鼓励使用指导书测试自己对警觉性的认识。第二周，用户根据指导书，使用音频CD学习自我报警技术。第三周之后，研究人员给了用户一种新的生物反馈装置，其内置一个能实时检测用户使用该技巧的能力的SHIMMER GSR传感器。该生物反馈装置有一个用户友好型的外形，类似一个坐垫，只有一个通断开关，内置一个LCD显示屏，能够向用户反馈自己使用该技巧的能力。研究过程中的数据被保存在内置的micro SD卡上，在研究结束后用于分析。

为了根据人类学研究结果做调整以及对技术和研究方法进行重新构思，研究人员开发了一套更可靠的用户友好型系统。新的技术允许用户一有时间就可以快速简单地练习他们的自我警觉性技巧。新方法帮助那些更了解警觉性的用户和更愿意、更有能力提高日常生活警觉性的用户完成了研究目标。新技术的低成本和邮寄式的使用方式使得研究人员能够将系统推广到更多的家庭中，这是基于PC和家庭使用

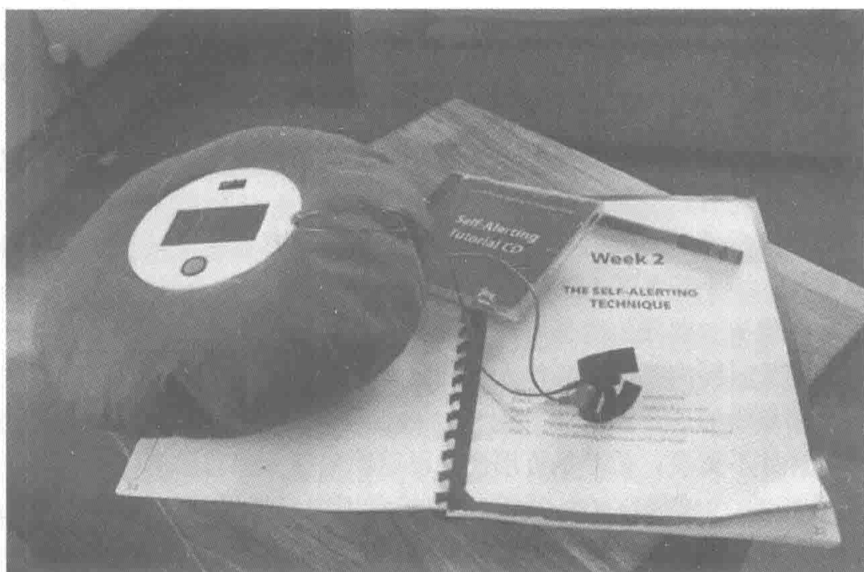


图8-9　专注生活训练坐垫及支持材料

团队的技术不可能完成的。

8.9　经验总结

由于大多数家庭本身大不相同，因而周围环境监测或需要直接与人接触的传感器相关技术的使用面临着巨大的挑战。预先的计划和准备是成功的必要因素。当每一个操作或者一系列操作完成时，仔细寻找哪些起作用哪些不起作用是非常重要的。有关任何使用积极和消极的见解将会保证更高成功的可能性。下面各节将讨论一些来自 Intel 和 TRIL 中心研究者多年来总结的关于基于家庭和社区的传感器使用的深刻见解。

8.9.1　安装过程

技术安装应尽可能快。经过90min 的安装，用户会疲劳，变得不耐烦，甚至不得不离开赴其他约。即使是简单的安装也很容易超过90min 这个阈值。因此，工程师的事前准备对于尽量减少现场安装时间至关重要。涉及传感器校准的安装复杂，很可能超过2h，这一般是不可取的。安装处安装前后的照片或布局十分重要，尤其是在拆卸后有可能会出现问题的情况下。

8.9.2　关键传感器的隐藏

传感器必须尊重测试对象和用户的隐私和安全。未加密的无线连接有被屋外的人窃取数据的风险。传感器应避免传输个人身份信息。理想情况下，用户的任何信息都不能被窃取。当传感器在家中使用或者长时间佩戴在体表时，这个问题尤其值

得关注。

在测量人们行为的传感器系统应用中，传感器应尽可能不影响人的行为。传感器的维护也必须加以考虑：需要每天充电的穿戴式传感器要求使用者记得摘除设备、充电、再重新戴上。这对很多人来说是个不小的挑战。而荒谬的是，记得每隔一天充一次电比每天充电要更困难。

设计对家庭传感器系统的成功起到关键作用。传感器的设计不应引起用户不必要的隐私担忧。一个配备了 LED 闪烁灯的系统设计很可能会让参与测试的人员担心房间里有摄像头，即便传感器本身并没有摄像功能。穿戴式传感器的设计尤其重要，它们在很长时间内都会被其他人看到。老年人对让他们觉得自己需要依赖或健康状况不佳的显眼的迹象很抗拒。对于一次性使用的传感器或周围环境监测传感器，美学设计并不重要，关键是可用性。可用性包括传感器如何佩戴和固定在人的体表（见第 10 章）。例如，在一个运动分析应用中，如果需要用一根带子将一个传感器固定在肢体上，那么带子的设计必须保证在整个评估/检测过程中传感器都能安全地固定住且方向始终正确，同时，还要满足传感器的佩戴简单舒适等要求。传感器的设计很可能对测试对象的舒适程度有直接影响。例如，要求用户睡觉时穿戴的传感器尤其需要舒适，不然会影响穿戴者的睡眠。周围环境监测传感器应设计为尽可能减少对位置的限制。壁挂式传感器必须能与墙上已有的照片、画作、书架、挂毯、花瓶和其他装饰物共享空间，且能在视觉形态和颜色上与这些装饰共存。颜色较浅、较柔和的设备会比颜色较深、饱和度较高的设备更易融入到装饰物中。

安装好的系统应尽量减少对安装工程师出现的要求。续航能力差的壁挂式传感器意味着安装工程师需要频繁出现。工程师的来访会打扰到参与者的生活，并不断提醒他们是在一项研究中，降低了传感器的隐蔽性，结果是降低了数据的有效性。

由于各种工业、科技和医疗（ISM）无线电设备，2.4GHz 无线电频段十分拥挤，如蓝牙设备、某些数字增强无线通信（DECT）电话、家庭无线网络、微波炉、婴儿监视器、智能电视机等。某些设备可能会严重干扰传感器的传输。解决这一问题的关键是无线通信方式的选择。例如，蓝牙和 802.11 协议可以跳频以避免同频带干扰。相似的，超宽带（UWB）能自动搜索到未被使用的频段并在此频段工作。相反，802.15.4 协议不支持跳频，因此易受到干扰。如果使用不支持跳频的通信协议，则必须手动选择一个频道以避免附近 ISM 无线源的干扰。所使用的技术不仅要能与环境互不干扰，还要与其他已使用的技术互不干扰，这点十分重要，尤其是两个家庭或两个诊所的系统在各自的无线电范围之内时。

无线传输往往是传感器中耗电最多的部分。因此工作周期的设计应重点减少通信传输的数据量和次数。但低通信频率的设计会导致难以区分发生故障的传感器和还没有到通信时间的传感器。为避免出现这个问题，每个传感器都必须发送一个周期性的“心跳”或“保活”信号。数据传到后端系统，如 RDF，进行处理，若在预定义的时间窗内未收到传感器的“心跳”信号，则产生一个传感器故障的警告。

8.9.3　数据质量

从技术角度看，数据的质量受到传感器层、应用层、聚合/传输层、分析层的影响。大多数传感器使用低功耗无线电，经常产生服务中断。因此，传感器发送和接收的数据要么被可靠地传输（例如，通过一个确认与重发协议），要么冗余传输（每次传输的数据长度固定但无需确认）。传感器协议也应该支持接收端错误检测。报文校验和循环冗余校验（CRC）通常足以检查出常见的传输错误。

对于在医生办公室进行评估等应用，自动检查来自传感器的数据质量十分重要。检测到任何问题——如严重丢包、传感器通信临时中断或测试时间不完整——都应该强制重新测试。任何不是由于测试对象测试表现本身引起的变化都会导致结果不准确，其幅值取决于所用的数据分析算法。类似于 8.8.1 节中的跌倒风险评估等应用对数据的变化十分敏感。因此，这些应用必须严格检查以确保数据质量。

在后端数据库中尽早检查传感器/数据聚合器的数据错误或丢失很重要。数据聚合/传输层应对设备问题提供早期检测。这一层还应该按稳定的传输协议传输数据以防止数据聚合器和后端之间的数据丢失。所采用的解决方案的鲁棒性取决于其对数据丢失的敏感性和时间限制。

为确保数据处理阶段的数据质量，对数据进行合理的滤波很重要，要避免滤波不足和过度滤波。理想情况下，数据应在“安静的”电环境中记录，穿戴式传感器应被牢固地固定在适当位置。这些措施能减少对滤波的要求。处理惯性信号和生理信号时，对数据做合理的校准很有必要，检查加速度数据时要考虑重力加速度校正。最好检查从处理的数据中提取出的特征值是否在合理范围内，是否与直觉相符。

8.9.4　用户参与

维持用户的参与度是对家庭评估和干预的基本要求。一次不佳的技术使用体验就会产生负面情绪并导致该技术被抛弃。良好的设计和可靠的技术对于创造良好的用户体验和增强用户对技术的信心至关重要。开发家用和社区用传感器技术的另一个重要方面是用户在设计过程中的参与。有最终用户代表参与设计的技术更易于被最终用户接受，并能确保他们的日常生活不会受到负面影响。用户参与设计会增加发现和成功解决出现的可用性问题的概率。

用户参与的一个问题是向用户反馈。向最终用户提供反馈可以激励最终用户并保持对技术的参与度。因此有趣直观的数据可视化十分必要。包含许多控制范围的趋势图的技术反馈对于工程师来说可能是直观的，但对大部分用户来说并不是这样。设计简洁、动态呈现、数据生动有助于维持用户长时间的参与度。设计中可以加入社交网络的元素，用户可以通过社交网络与他们的朋友比较。但这些信息应以合适的方式展示给用户，防止他们过于担心自己与其他人有显著的差异。如今越来越多的人使用电脑游戏技术来提供反馈，如虚拟家庭环境中代表用户的头像。这些

技巧已在运动和健康感应等应用中使用，其专注于用游戏技巧介绍竞争的元素。设计中引入竞争元素可以保持用户长期参与体育运动的积极性。

8.10 小结

在本章中，我们已经概述了多学科团队如何开发和使用家庭和社区环境中创新性的评估和干预技术。无线传感器、设备的移动性、数据的智能分析使得以前只能在专业诊所内采用的技术转移到了家庭和社区中。TRIL 中心已经证明，成功的技术解决方案需要结构化的方法来确保多学科团队的成员协同工作，而最终用户才是设计工程中的核心。

参考文献

Alwan, Majd, "Passive in-home health and wellness monitoring: Overview, value and examples," in *IEEE Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS '09)*, Minneapolis, Minnesota, USA 2009, pp. 4307–4310.

McManus, Richard J, *et al.*, "Blood pressure self monitoring: questions and answers from a national conference," *BMJ*, vol. 337 2008.

Tamura, Toshiyo, Isao Mizukura, and Yutaka Kimura, "Factors Affecting Home Health Monitoring in a 1-Year On-Going Monitoring Study in Osaka. ," in *Future Visions on Biomedicine and Bioinformatics 1*, Bos, Lodewijk, Denis Carroll, Luis Kun, Andrew Marsh, and Laura M. Roa, Eds., Heidelberg, Springer 2011, pp. 105–113.

Cohen, Jacob, *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, 2nd ed. Oxford, England: Routledge Academic, 1988.

Catherwood, Philip A., Nicola Donnelly, John Anderson, and Jim McLaughlin, "ECG motion artefact reduction improvements of a chest-based wireless patient monitoring system," presented at the Computing in Cardiology, Belfast, Northern Ireland, 2010.

Ghasemzadeh, Hassan, Roozheb Jafari, and Balakrishnan Prabhakaran, "A Body Sensor Network With Electromyogram and Inertial Sensors: Multimodal Interpretation of Muscular Activities," *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 14 (2), pp. 198–206, 2010.

Aziz, Omer, Benny Lo, Ara Darzi, and Guang-Zhong Yang, "Introduction," in *Body Sensor Networks*, Yang, Guang-Zhong, Ed., London, Springer-Verlag, 2006, pp. 1–39.

Greene, Barry R., *et al.*, "An adaptive gyroscope-based algorithm for temporal gait analysis," *Medical and Biological Engineering and Computing*, vol. 48 (12), pp. 1251–1260, 2010.

Scanaill, Cliodhna Ní, *et al.*, "A Review of Approaches to Mobility Telemonitoring of the Elderly in Their Living Environment," *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 34 (4), pp. 547–563, 2006.

Wood, Anthony D., *et al.*, "Context-aware wireless sensor networks for assisted living and residential monitoring," *IEEE Network*, vol. 22 (4), pp. 26–33, 2008.

Lee, Byunggil and Howon Kim, "A Design of Context Aware Smart Home Safety Management using by Networked RFID and Sensor Home Networking." vol. 256, Agha, Khaldoun Al, Xavier Carcelle, and Guy Pujolle, Eds., Springer Boston, 2008, pp. 215–224.

Kelly, Damien, Sean McLoone, Terrence Dishongh, Michael McGrath, and Julie Behan, "Single access point location tracking for in-home health monitoring," in *5th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC 2008)*, 2008, pp. 23–29.

Hagler, Stuart, Daniel Austin, Tamara L. Hayes, Jeffrey Kaye, and Misha Pavel, "Unobtrusive and Ubiquitous In-Home Monitoring: A Methodology for Continuous Assessment of Gait Velocity in Elders," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 57 (4), pp. 813–820, 2010.

Hayes, Tamara L., Stuart Hagler, Daniel Austin, Jeffrey Kaye, and Misha Pavel, "Unobtrusive assessment of walking speed in the home using inexpensive PIR sensors," in *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2009)*, Minneapolis, Minnesota, USA, 2009, pp. 7248–7251.

Biswas, Jit, *et al.*, "Health and wellness monitoring through wearable and ambient sensors: exemplars from home-based care of elderly with mild dementia," *Annals of Telecommunications*, vol. 65 (9), pp. 505–521, 2010.

Middleton, Catherine, "Delivering services over next generation broadband networks: Exploring devices, applications and networks," *Journal of Australia Telecommunications* vol. 60 (4), pp. 59.1–59.13, 2010.

Bresnick, Jennifer. "*HIMSS survey: 80% of clinicians use iPads, smartphone apps to improve patient care*", Last Update: December 4th 2012, http://ehrintelligence.com/2012/12/04/himss-survey-80-of-clinicians-use-ipads-smartphone-apps-to-improve-patient-care/

Prestigiacomo, Jennifer. "*Dialing Into Physician Smartphone Usage*", Last Update: August 3rd 2010, http://www.healthcare-informatics.com/article/dialing-physician-smartphone-usage

Smith, Ken, "Innovations in Accessibility: Designing for Digital Outcasts.," presented at the 58th Annual Conference of the Society for Technical Communications, Sacramento, CA., 2011.

Mulvenna, Maurice D., *et al.*, "Evaluation of Card-Based versus Device-Based Reminiscing Using Photographic Images," *Journal of CyberTherapy & Rehabilitation*, vol. 4 (1), pp. 57–66, 2011.

Schmeier, Sven, Matthias Rebel, and Renlong Ai, "Computer assistance in Bilingual task-oriented human-human dialogues," in *Proceedings of the 14th international conference on Human-computer interaction: interaction techniques and environments*, Orlando, FL, 2011, pp. 387–395.

Barnes, Ian, Elizabeth Brooks, and Grant Cumming, "Toilet-Finder: Community co-creation of health related information," presented at the 3rd International Conference on Web Science (ACM WebSci'11), Koblenz, Germany, 2011.

Mantyjarvi, Jani, Mikko Lindholm, Elena Vildjiounaite, Satu-Marja Makela, and Heikki Ailisto, "Identifying users of portable devices from gait pattern with accelerometers," presented at the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '05), Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2005.

Khan, A. M., Y. K. Lee, S. Y. Lee, and T. S. Kim, "Human Activity Recognition via an Accelerometer-Enabled-Smartphone Using Kernel Discriminant Analysis," presented at the IEEE 5th International Conference on Future Information Technology (FutureTech), Busan, South Korea, 2010.

LeMoyne, Robert, Timothy Mastroianni, Michael Cozza, Cristian Coroian, and Warren Grundfest, "Implementation of an iPhone as a wireless accelerometer for quantifying gait characteristics " in *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC '10)* Buenos Aires, Argentina, 2010, pp. 3847–3851.

Philips Electronics N.V. "Motiva - Improving people's lives", http://www.healthcare.philips.com/main/products/telehealth/products/motiva.wpd., 2013.

Blackburn, Steven, Simon Brownsell, and Mark S Hawley, "A systematic review of digital interactive television systems and their applications in the health and social care fields," *Journal of Telemedicine and Telecare*, vol. 17 (4), pp. 168–176, 2011.

Ganeriwal, Saurabh, Laura K. Balzano, and Mani B. Srivastava, "Reputation-based framework for high integrity sensor networks," *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 4 (3), pp. 1–37, 2008.

Melodia, Tommaso, Dario Pompili, Vehbi C. Gungor, and Ian F. Akyildiz, "A distributed coordination framework for wireless sensor and actor networks," in *Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, Urbana-Champaign, IL, USA, 2005, pp. 99–110.

Li, Lily and Kerry Taylor, "A Framework for Semantic Sensor Network Services," in *Service-Oriented Computing – ICSOC 2008*. vol. 5364, Bouguettaya, Athman, Ingolf Krueger, and Tiziana Margaria, Eds., Springer Berlin / Heidelberg, 2008, pp. 347–361.

Balazinska, Magdalena, *et al.*, "Data Management in the Worldwide Sensor Web," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 6 (2), pp. 30–40, 2007.

McGrath, Michael J. and John Delaney, "An Extensible Framework for the Management of Remote Sensor Data," in *IEEE Sensors*, Limerick, Ireland, 2011, pp. 1712–1715.

Walsh, Lorcan, Barry Greene, and Adrian Burns, "Ambient Assessment of Daily Activity and Gait Velocity " in *Pervasive Health 2011 AAL Workshop*, Dublin, 2011.

Burton, Darren and Mark Uslan, "Diabetes and Visual Impairment: Are Insulin Pens Acessible?", *AFB AccessWorld Magazine*, vol. 7 (4), 2006, http://www.afb.org/afbpress/pub.asp?DocID=aw070403

Bailey, Cathy, *et al.*, "ENDEA": a case study of multidisciplinary practice in the development of assisted technologies for older adults in Ireland," *Journal of Assistive Technologies*, vol. 5 (3), pp. 101–111, 2011.

Kohavi, Ron, "A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection," in *14th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'95)*, Montreal, Quebec, Canada, 1995, pp. 1137–1143.

Han, Jiawei and Micheline Kamber, *Data Mining: Concepts and Techniques*, 1st ed. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 2000.

Beauchet, Olivier, *et al.*, "Timed up and go test and risk of falls in older adults: A systematic review," *The journal of nutrition, health & aging*, vol. 15 (10), pp. 933–938, 2011.

Greene, Barry R., *et al.*, "Quantitative Falls Risk Assessment Using the Timed Up and Go Test," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 57 (12), pp. 2918–2926, 2010.

Bogle, Linda D, Thorbahn, and Roberta A Newton, "Use of the Berg Balance Test to Predict Falls in Elderly Persons," *Physical Therapy*, vol. 76 (6), pp. 576–583, 1996.

Greene, Barry R., *et al.*, "Evaluation of Falls Risk in Community-Dwelling Older Adults Using Body-Worn Sensors," *Gerentology*, vol. 58 pp. 472–480, 2012.

Greco, Eleonora, Agnieszka Milewski-Lopez, Flip van den Berg, Siobhan McGuire, and Ian Robertson, "Evaluation of the efficacy of a self-administered biofeedback aided alertness training programme for healthy older adults " presented at the 8th Annual Psychology, Health and Medicine Conference, Galway, Ireland, 2011.

第 9 章　医疗应用的穿戴式、周围环境监测与用户使用的传感技术

随着传感器和传感器系统技术的进步，尤其是在最近十年，新医疗监测设备的发展保持着持续增长的势头，并有能力进一步降低医疗保健的成本。此外，全球人口的增长使我们重新思考医疗保健的实现方式。我们必须改变目前医疗保健的方式，否则医疗保健的成本会持续地增长，达到经济上无法承担的程度。技术发展使得临床诊断更加灵活，并且使新型的消费者医疗保健市场成为可能。传感器和传感器技术在医疗创新中起着关键的作用，随着它们与一系列其他信息通信技术（ICT）融为一体，这种创新将持续到未来，以提供令人振奋的新功能。

新型传感技术，比如微机电系统（MEMS）、生物化学传感器、免疫传感器等的陆续出现，加速了医疗保健的发展。传感技术使得健康状态定期或连续监控成为可能，这反过来使得新型积极护理模式的实现成为可能。因为干预治疗更为有效并且成本更为低廉，病症会更早地得到诊断，所以从长远来看，病人的未来会得到改善。在监测慢性疾病的远程医疗领域中，已经找到了用于持续监测的解决方案，比如慢性阻塞性肺病（COPD）、充血性心力衰竭（CHF）和糖尿病。这种监测方式为疾病状态提供持续的观测，通过预测和防止疾病的急性发作，从而降低身体和经济上的成本。在急性发作后治疗病人，目前常采用应急护理模式，这种模式可能导致患者的健康和幸福毁灭性和不可逆转的改变，并且加速病人的身体衰弱。随着时间的推移，传感技术也会应用于普通人口筛查，成为国家卫生保健计划的一部分，以提高公共卫生水平。个体，尤其是那些没病找病的“疑病症”个体（那些身体健康，但是担心生病，并且通过拜访他们的医生、检测自身或者没有医学根据而服用药物以寻求安慰的个体），也很有可能会使用传感技术来积极地监测和维持他们自身的健康。

随着流行的传感技术成为医疗规范，它们会显著地增加我们在疾病风险和干预治疗有效性方面的知识。现有的技术方案能帮助我们更好地理解衰老的过程，包括识别认知能力下降、衰弱的早期迹象，以及运动和神经系统的问题。传感器技术通过建立对人体健康状态变化的详尽的认知使得在个体水平上了解人体的健康状况成为可能。这些数据能提供对人体健康影响最大的病症的早期预警信号。

9.1　改变我们医疗工作的方式

如今，医疗工作是通过以医生为中心的模式进行的。这个模式可能现在是十分

合适的，但是对于未来来说它是有局限的。世界人口的老龄化越来越严重，2010年，大约有5亿人口超过65岁，由于生活水平的提高，这个数字预计在2050年会超过15亿（Suzman et al.，2011）。文明病，像高血压、糖尿病和肥胖症，也在显著地增多，导致医疗消费持续不断地增长，并且很快地接近到西方经济所不能承受的程度。如图9-1所示，2010年，美国在医疗上总计消费2.6万亿美元（占GDP的17.92%），这和1960年占5.2%GDP的医疗消费形成强烈的反差。如果医疗消费一直保持当前的增长趋势，美国国会预算办公室预计到2025年医疗消费会达到GDP的25%，2050年会达到37%，2082年会达到49%（Fodeman et al.，2010）。

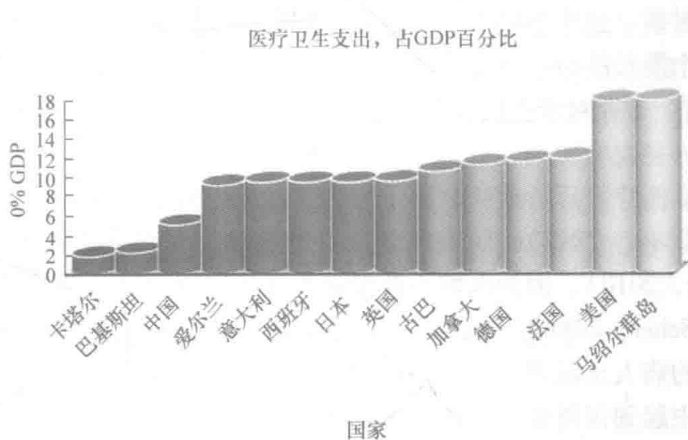


图9-1　2010年医疗支出占GDP的比例（来源：WHO）

医疗资源的需求会持续增长：我们活得越久，年龄相关的慢性疾病，比如慢性阻塞性肺病和认知能力下降等，出现的概率越高。科学的进步将会把先前被认为是致命的一类疾病（如癌症）变得像普通的慢性疾病一样。如果不改变医疗服务的方式，到2040年，大约25%的西方国家民众可能会不得不加入到需要医疗服务的行列中（Vavilis et al.，2012）。因此，我们迫切需要找到一种新的方法来从事医疗事业以减少使很多西方国家不堪重负的医疗成本。

现代的生活方式对人们健康的影响越来越重要。像冠心病、高血压、糖尿病和一些癌症（比如肺癌）这些非传染性疾病已经在临床上被证明是与生活方式相关的。这些“文明病”正在成为引起死亡最主要的因素（Colvin，2012）。影响文明病的因素包括久坐的生活方式、肥胖、高脂肪高糖高盐量饮食、吸烟以及过多的酒精摄入。人们正在寻求用于活动监控的技术支持，使人们能意识到自己久坐的生活方式。传感技术和配套软件可以用来促使人们养成良好的生物习惯，使他们在晚年生活得更加健康（Corocoto，2011）。各种各样的产品，比如耐克腕带（Nike Fuel）和智能手环（Fitbit），使人们更加活跃，并提供了一种使人们长期从事健身活动的机制，我们将在第10章更详细地讨论体育和娱乐领域的传感技术。

疾病的发生率无论是与生活方式相关，还是与衰老相关，它都迫使我们思考目

前和未来从事医疗事业的方式。调整医疗事业的模式需要一种多样化的方式，并且需要做到如下的改变：

- 在家庭和社区环境中使用筛查和评估技术以减少医院的压力。
- 从应急模式转变为预防模式。
- 个性化医疗面向个体，包括风险因素鉴别、预防介入以及治疗。
- 让人们更大范围地参与监测和维护自身的健康中。
- 使用科技更好地管理临床工作，让医疗人员更好地把握病人的需求。

但是，就信息通信技术而言，医疗市场是一个极其保守的市场，尤其在谈到大型体制变化的时候。这个市场中，设备在使用之前需要进行验证和评估，因此，新商品上市是一个漫长的过程（我们在第6章中已经讨论了医疗设备监管和认证过程)。最后，这个行业对于供应商的需求很多，包括在重要医疗情况下对产品负责的能力。

长期以来，医疗管理行业一直都是行为驱动或者有偿服务模式，通过有偿服务以得到回报（Chase，2012)。随着住院消费的迅猛增长，病患恢复结果越来越得到重视（Porter，2010)。因为医院不补偿病人在指定期间因为同样问题再次入院的费用，政府（Scher，2011）和私人保险行业现在逐渐开始重视病患恢复的效果。通过提供大量的病人出院前的临床数据和出院后的家庭测量数据，传感技术在实现新的医疗模式中起到很重要的作用。由于在家中可以使用传感技术来维持病人的健康，这样可以避免或者减少急性疾病入院的大量费用，因此保险公司对于传感技术也越来越感兴趣。

从长远来看，保险公司和类似的组织对健康相关的传感器数据的使用无疑会引起重大的社会争议。保险公司已经开始使用复杂的统计模型，基于客户或者他们家人先前的医疗历史来估计未来的风险。随着传感器数据尤其是基因信息的实用性提高，我们有可能量化一个个体的基因对于行为风险的影响。原则上，某些人可能会缴纳过高的保险费，或者甚至不能参加保险。人们在伦理上很可能会强烈的抵制使用基因因素来确定保险的费用，尤其在无法评估他们从父母那遗传的基因风险的情况下。我们真正需要面对的可能是可改正的行为，举个例子，根据治疗方案，如果某个人的行为使预计的消费成本增加，那么其他人是否也应该忍受更高的保险费所造成的负担？传感器获得的信息将有助于解决这场争议，因为它会使得行为规范变得有迹可循。

随着非处方诊断性测试、直接面向消费者的基因检测试剂盒、生理监测传感器以及生育能力监控的普及，我们正在朝着“量化自我”和“生命记录”的网上在线方式发展。人们可能会为各种各样的动机所驱使，比如努力激发探讨、寻求治疗方法或者尝试一个已知疾病风险的预防性措施。他们会选择亲自或者是通过网络论坛向社会分享这些信息。他们有很强的欲望去理解这些数据提供给他们的信息，并且使用这些数据去提高他们自身的健康水平。正如第7章描述的那样，这个过程正

在改变人们和他们的个人医生之间的交流。目前，这种基于数据驱动讨论的范围还是有所限制的。像妇产科一类的领域，对于传感器数据的使用已经变成一种规范，并且由病人和临床医生共同见证了它对于会诊过程的重要价值。但是，在临床社区中使大家接受个人传感信息还需要很长的时间。像数据质量、责任以及关联性这一类问题必须得到解决才能获得人们的认可。正是因为使用了传感器，我们才朝着转变这种现状的方向进行了尝试。

医疗是我们理解和治疗个人疾病方式改变的关键。我们开始远离基于经验和人群的医学，而接受精确的个性化医学。由于“OMIC”技术（即基因组学、转录组学、蛋白质组学和代谢组学）的进步，病理学研究已经开始在分子水平上进行。这种分子水平上的分类意味着我们可以根据疾病的分子水平行为和个体的DNA来选择最佳的治疗方法。传感技术在个性化医疗中起着关键的作用。基于传感器的配套试验决定一个病人能否从基因靶向药物治疗中获益，并且传感器会在治疗的过程中监控病人（比如，监控与药物的靶向代谢途径相关联的生化副产物）。在接下来的数十年里很有可能从根本上改变我们的疾病诊断、预后和治疗干预的方法。

9.2　传感器检测的背景信息在医疗中的应用

背景信息在决定传感器数据的价值中起到很重要的作用。比如，一些在孤立环境中获取到的传感器读数可能会有局限。这些局限至少可以通过采集检测相关背景信息得到部分解决。当测量数据采集的时候，这个人正在干什么？他处于什么环境中？所处位置的什么环境条件会影响测量结果呢？在获取生理测量数据的时候，检测相关背景信息特别重要，比如心率测量前的活动量。检测相关背景信息一般可以通过使用其他的传感器、加速度计获得，比如，确定一个人在生理测量进行时是否移动。

定性的方法，比如每周的健康调查问卷，也是很有用的。这些方法通常在慢性病管理体系中使用。但是，自我汇报的信息的质量是取决于病人反馈信息的准确性的，这一般是很难做出判定的。在采集检测背景信息来进行临床传感器读数或者观察的时候，保证任何数据都有适当的时间分辨率和空间特征也是十分重要的。如果没有准确地匹配的话，额外的信息会使得获得的数据变得模棱两可。传感检测背景信息一般可以通过以下三种方式使用：

- 常见的方法是临床医生在一个特定的基础上人工地检查背景传感器信息来进行解析过程。

- 另外，背景信息也可以用测量传感器得到的相同或相关的图形或表格重叠的部分表示，这种图形重叠可视化对于理解分析过程非常有帮助。

- 最后，最复杂的步骤就是测量背景数据和感兴趣的数据源的智能化和自动化的融合过程。在减少数据维度和推断更高级别的信息中，数据融合算法是非常实

用的，数据融合算法对于判定背景信息测量是否有效是很有帮助的。

检测背景信息在确定传感器网络的安全性、隐私、性能和访问需求等方面起到很重要的作用，这将是继续保持活跃的研究领域。比如弗吉尼亚大学的 AlarmNet 提供的新的解决方案就是一个例子（Stankovic et al.，2011）。

传感器也可以用来为一个治疗方案的成功或是失败提供相关信息。通过了解门诊相关情况，医生可以优化现有的治疗方案或者提出新的方案。来自穿戴式传感器的数据可以和背景检测算法结合起来产生有用的信息。这些信息在合适的时间产生以支持病人特定的治疗方案，比如说催促病人吃药、提醒运动或者对食品和饮料的消费提出建议。

9.3 基于医院和社区的传感技术用于评估和诊断

传感技术渗透在医院护理的各个方面，从最简单地数字式温度计到复杂的激光制导的外科手术工具。成像传感器，比如 X 光、磁共振成像（MRI）、计算机断层扫描（CT）、正电子放射断层造影术（PET）以及超声成像，在非侵入的条件下使医生能够了解人体以及它是如何运转的。这些传感器从根本上改变了诊断医学。在内科，这些图片使医生能够精确定位受伤或是异常区域、做微创手术，以及评估医疗过程的成功或失败。在产科护理，超声成像使得医生可以监测胎儿发育并且鉴别可能影响母亲或胎儿健康的任何胎儿的或其他的异常情况。

临床病理学家每天在医院实验室使用复杂的传感设备来执行血液学、生物化学、免疫学、病理学、微生物学的研究功能。这些大型的、非离散的传感器需要经过训练的专业人员进行细致的样品制备才能保证准确的结果。传感器在治疗技术中也起到关键的作用。它们可以记录到一些特殊情况，比如一些异常的心跳信号，可以由医生或者传感器来判别。它们可以通过鉴别最佳服用药物时间来优化给药设备，并且它们可以持续追踪病人生命体征以保证治疗过程安全地进行，比如透析。成像、侵入式设备以及给药设备都广泛地使用传感器，它们本身就值得用整个章节来讲述。考虑到篇幅的限制，本书主要专注于分散的、非侵入式的监控和评估技术，它们可能很快就会应用到家庭或社区中。

9.3.1 监测生命体征

测量生命体征的传感器是医院最常见的传感器。病人的生命体征表示他们的主体机能的状态——通常是体温、脉搏（或心率）、血压、呼吸频率。根据检测背景，也会检测其他数据。例如，在急救情况，皮肤、瞳孔、意识水平也需要检测。在重症监护或手术台，血压、心率、动脉血氧合和许多其他变量使用传感技术实现持续监测。在较低水平的依赖条件下，这些数据是由护理人员间歇监测，他们使用便携式监控设备测量这些数据。一次性可穿戴式生命体征传感器开始出现，它使个

人的、低成本的、连续监测生命体征对于所有病人成为可能，而不用考虑健康状态和所处的位置。ABI 实验室估计到 2018 年，将会卖出 500 万台这些传感器（Comstock，2013）。同样地，针对精英运动员和普通人的传感技术，比如穿戴式脉搏监控器或者聚合了传感功能的智能服装已开始出现，用于确定人的行为表现和健康水平（见第 10 章）。

9.3.2　心率

心率是指心跳的速度。它通常测量每分钟跳动的次数。心率测量是为了检测心动过缓（心率慢）、心动过速（心率快）或心律失常（不规则心率和节律），它们任何一种都暗示着疾病。与许多重要的生命体征类似，心率也是和年龄相关的：婴儿的心率在每分钟 130 ~ 150 次是正常的，而成年人下降到每分钟 50 ~ 80 次。心率和背景环境是高度相关的：运动过后和有压力的时候，心率会提高，而运动员的静息心率比非运动员低得多。在给定的情况下，两种检测数据都不予考虑。测量心率的非技术性的方法是使用食指和中指在脉冲点（如手腕）感受动脉脉动。根据脉动计数计算出心率。在医院环境中，心率使用心电图仪连续测量（称为 ECG 或 EKG）。

心电图利用附着在皮肤表面的电极、滤波电路和数据记录器测量心肌的电活动。心率可以通过测量心电信号的一个 R 波和下一个 R 波之间的时间间隔确定，这称为 R－R 间期。心率的变异性可以预测很多疾病，包括充血性心力衰竭。心电信号的不同点之间的时间间隔（见图 9-2）可以表明一些情况，包括低钙血症（缩短的 QT 间期）或冠状动脉缺血（扁平或倒置 T 波）。在医院环境中，12 导联心电图用于诊断，5 导联和 3 导联心电图用于连续监测。引线的数量指的是和身体相连的电极数。每个电极用电缆与数据滤波和记录电路相连。正确地连接心电图的电极，以及解读心电图的结果都是需要专业知识的。

健康和家用型心率传感器开始朝集成无线心电设备发展，它可以简化电极的放置和数据的解读。多普勒（Doppler）胎儿监护仪使用一种手持式超声换能器检测胎儿心率，这种换能器可以检测到心跳并且产生对它的声音模拟。这些设备由产科和社区医生使用，而且越来越多地被出售给个人使用。心率也可以通过脉搏血氧仪或身体振动（心振描记法）测量。

9.3.3　血压

血压是由大动脉壁的血液所造成的压力，如手臂上的肱动脉。高血压是中风、心脏病和慢性肾功能衰竭的危险因素；因此，血压的监测对于诊断和持续监控治疗后的影响都是必不可少的。然而低血压也是存在问题的，它会造成晕厥或是眩晕。血压通常采用舒张压和收缩压来描述，并通过毫米汞柱（mmHg）度量。收缩压是

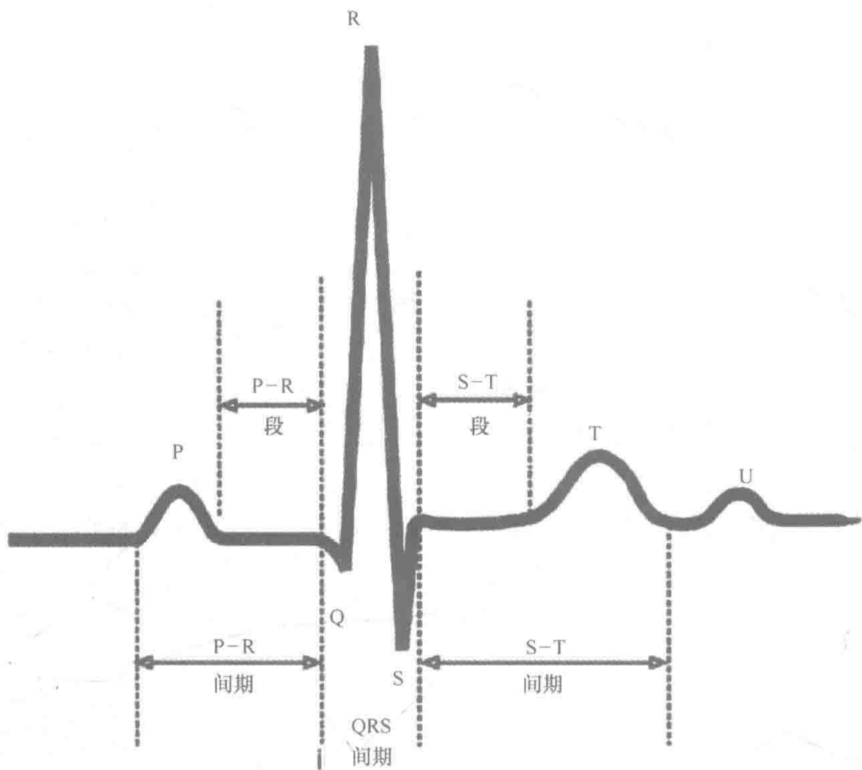


图 9-2　心电图信号及其各种标志和间期

心动周期动脉中的压力峰值，而舒张压是心动周期中静息期的最低压力。

一个静息的健康成人的血压约为 120mmHg 收缩压和 80mmHg 舒张压（记为 120/80mmHg）。动脉血压（BP）是测量血压的最准确的方法。这种侵入式的方法是将插管插入血管并且把插管连接到电子压力传感器。它通常只用于重症监护、麻醉和科学研究。非侵入式的方法更简单更快而且不需要太多的专业知识，但是不太精确。非侵入式方法测量充气袖带恰好堵塞住血流时的压力（收缩压），以及充气袖带恰好允许血液无限制流动时的压力（舒张压）。常规检查和监测血压非侵入式的方法有三种：

- 听诊法需要临床医生使用充气袖带手动地在上臂压缩动脉。医生用听诊器监听动脉，区分血流恰好开始在流回动脉（收缩压）与听不到血液声音（舒张压）的时间。这些时间点的血压可以从连接到袖带的水银或无液压力计上读出。尽管这种方法高度依赖于人的听力和解释，但是它仍然被大多数人认为是金标准。
- 示波法用于长期测量、家用测量，有时也会在一般的实践中使用。该设备从功能上来说和听诊法相同，但它把一个电子压力传感器（传感器）安装在袖带上以检测血流，从而取代听诊器和专家的耳朵。这些设备使用一种方法，称之为平

均动脉压（MAP）来计算血压。该算法的精度在不同设备间有很大的区别，因此，有必要把家庭读数和精确血压测量设备的数据对比一下，从而消除疑虑。

- 连续无创动脉血压（CNAP）用于研究、重症监护和麻醉，为了比听诊法或示波法更为细致地了解血压。有三个常用的方法：动脉张力测定法是一种用于测量血压的技术，它将压力传感器阵列通过皮肤压在动脉。第二种方法，脉搏传导时间（PTT）是一个脉搏波在两动脉部位之间的传导时间。血压可以从 PTT 逆向确定。第三种方法常采用夹紧手指，使用光发射器和接收器测量手指的血液量。调整手指套的压力以保持手指血容量的恒定。该压力和病人的血压是相对应的。CNAP 方法一般比较昂贵并且局限在医院使用，然而目前社区型 PTT 血压设备已经开始使用，此外家用型血压设备，如 Scandu Scout（www. scanadu. com），很快就可以使用到。

虽然每年测量血压可能适合没有心血管疾病风险的健康的年轻人，但是在许多情况下，血压需要更详细的或长期的研究。当老年人从坐姿到站立时，他们受损的血压调节机制可能会使血压突然下降。这是一个众所周知导致摔倒的危险因素，这只能在临床上通过使用逐搏的 CNAP 技术诊断。在有些情况下，在医生办公室获得的血压读数有时也并不是代表病人的实际血压。在临床环境中“白大衣高血压”能引起一些患者的血压上升。这是一个非常普遍的现象，可能会导致医生给不需要的人开降压药。血压昼夜节律变化也会导致不正确的用药处方。有些患者，在白天有高或正常的血压，晚上可能会有较低的血压。降血压药物处方可能对降低白天测量的高血压有效，也会在夜晚将患者的血压降低到较低的危险水平。动态血压监测，以 24h 为周期使用可穿戴式振动装置，是确定血压昼夜节律的唯一途径。随着形式和解析技术的发展，在医院外监测血压这一有价值的生命体征会越来越小型化、成本越来越低、检测结果越来越精确。

9.3.4　体温

人体有许多调温机制。当身体太热的时候，皮肤中的血管扩张（扩大）将多余的热量运输到皮肤表面，在那里通过排汗排出。当身体很冷的时候，通过血管收缩（缩小）减少皮肤的血流量和通过颤抖产生热量，这样可以保存身体的热量。一个异常低（体温过低）或高（体温过高）体温会产生严重的后果，甚至危及生命。因此温度传感器是表征健康状况的必不可少的、低成本的可靠方法。体温可以在身上多个位置测量，包括嘴、耳朵、腋下、直肠、膀胱、额头、皮肤、食道，见表 9-1。测量体温的传统方法——水银温度计，已经被接触式和非接触式传感器取代。接触式温度传感器与和它们接触的任何对象达到热平衡。它们可以通过测量自身的温度来表征被测对象的温度。非接触式温度传感器测量来自被测物体的亮度或光谱辐射产生的辐射热量。

表 9-1 目前人体温度传感测量方法

位置	传感器	优点	缺点
直肠温度探头	顶部带热敏电阻的柔性导管或水银温度计	核心温度的精确测量	变化缓慢 比其他方法稍高（最高至 0.3℃） 可能导致污染物扩散 可能导致直肠穿孔
口腔温度计	水银温度计或数字式温度计	容易获得 不易操作失误 快速反映核心体温的变化	易受食物或饮料的摄入和口腔呼吸的影响
腋下温度计	水银温度计或数字式温度计	容易获得 无明显不适的可重复温度测量	需要时间来记录温度（3～4min）
食道温度	柔性热敏型探头	精准地估计核心温度	侵入式的（只在麻醉时使用） 位置太靠近气管可能导致较低的读数
肺部温度	热敏电阻	体温的黄金标准	侵入式的（仅限于已经放置了肺动脉导管的重症病人）
膀胱温度	热敏电阻头导管	与直肠、食管和肺动脉温度高度相关	侵入式的（只适合那些需要膀胱导管的病人） 精度依赖于尿液输出
鼓膜温度（接触式）	小的热电偶或热敏电阻探头	由于邻近下丘脑被认为是黄金标准	如果没有耳镜很难精确定位 如果定位不准确，结果不精确 有鼓膜穿孔和出血的风险
鼓膜温度（非接触式）	红外发射探测器（热电偶传感器或热释电传感器）	1～2s 内对核心温度的合理估计 适合清醒的病人	
颞动脉（头）测温	红外发射探测器	容易获得 没有对病人造成伤害的风险	测量头部温度，这与核心温度不相同（需要补偿算法）
皮肤测温	热电偶或附着液晶的胶垫	安全 精确到 ±0.1°C 对于检查年长儿童很有用	比较难解释 不反映核心温度

（续）

位置	传感器	优点	缺点
奶嘴温度计	插在导热乳头奶嘴的热电偶	精确 方便 婴儿不难受	
吸收法测温	石英晶体温度传感器	直接测量核心温度	目前价格昂贵 只能工作1~2天

9.3.5　呼吸速率

呼吸速率是每分钟呼吸的次数。像心率一样，正常的呼吸速率取决于几个因素，包括年龄、情绪状态（例如哭泣或激动）和睡眠。异常高的呼吸速率称为呼吸急促。异常低的呼吸速率称为呼吸过慢。呼吸急促可以简单地由运动引起，或者严重地一氧化碳中毒。呼吸过慢可以表征如心脏组织损伤或高血压等问题。呼吸速率通常用于诊断睡眠中的暂停、浅或不频繁呼吸的情况，这种情况被称为睡眠呼吸暂停。这种情况会影响成人和儿童并且导致白天嗜睡，以及注意力和记忆力的问题。患者通常没有意识到他们有这种情况，需要技术来检测和监控这种情况的发展程度（见第10章）。睡眠呼吸中止症可在医院的睡眠实验室通过通宵的睡眠研究来诊断，在这期间对呼吸、脑电波、肌肉运动和眼球运动进行监测。没有生命支持机器便不能呼吸是脑死亡的三个关键标志之一（其他标志是处于昏迷状态、无脑干反射）。因而，在这种情况下，睡眠呼吸暂停检测的标准变得更加严格。

测量呼吸速率的非技术性的方法是在一个固定的期间内计算胸部上升和下降的次数。这种方法很容易出现误差。胸带和智能服装可以通过测量对织物的膨胀和收缩引起的张力变化来测量呼吸。接触式和非接触式声学和光学的方法也被开发用来测量呼吸。压力敏感的床垫已被用来测量宝宝或高危成人的呼吸速率。这些传感器通过测量随着人吸气和呼气引起的床垫的压力变化来检测呼吸。非接触式床边的传感器，如来自 BiancaMed 的 SleepMinder（biancamed. com），使病人在自己家中享受医院级别的呼吸传感技术成为可能。在医院环境中，呼吸速率可以从现有的心电信号或用于测量心电的电极得出。

9.3.6　血氧的监测

为了保持肌体机能正常，在血液循环到细胞和组织的过程中，人体血液中需要一定水平的含氧量。当含氧量低于某一水平（缺氧）时，人会喘气。动脉血中的含氧量可以通过动脉的血液样本测量。它也可以使用非侵入式的脉搏血氧仪来估计，它是一个小装置，可以夹在手指、耳垂或宝宝的脚上。脉搏血氧仪使用一种非侵入式的方法，可以用来监测病人的血氧饱和度。它在整个医疗领域中使用，特别

是用于评估有呼吸系统症状或者和呼吸相关的问题病人。正常的脉搏血氧仪读数范围为95% ~100%。低于90%的数值被认为是比较低的。

透射式脉搏血氧仪测量血液中的血氧饱和度，这是血含氧水平替代的测量方法。它通过从夹子的一侧发射两种波长的光，穿过病人，到达在夹子另一侧的光电探测器。脉动动脉血流可通过测量每个波长的吸光度变化得到确定。这个方法可用于测量外围的含氧和脱氧血红蛋白。反射脉搏血氧仪可以在脚、额头或胸部上使用。在该方法中，探测器位于邻近的平面（如前额）上的光源。许多情况会导致一个错误的 SpO_2 读数，特别是在使用发射探头的时候。这些情况包括皮肤色素、指甲油、移动、周围环境或者强光、缺血、缺氧、心脏骤停、探头的错位和静脉注射染色剂。必须考虑这些因素，并且如果对测量的血氧读数存在怀疑，那么应当使用血液测试确定是否缺氧。

9.4 社区应用的传感技术

如前文所述，人口模式转变正在使目前的护理反应模型变得不可维持，并且迫使医疗实现的方式发生一些巨大的变化。第一，医疗必须变得具有前瞻性和预测性以避免高代价的急性健康事件。第二，医疗必须个性化，而不是以人群为基础的，以确保最佳的治疗得以实现。第三，提供的服务必须是去中心化的，从医院转移到社区和家庭。技术将在所有这些转变中发挥关键作用。第一和第二医疗模式的变化将在本章的后面讨论，本节将讨论社区型传感技术的现状和未来。

社区护理是指社区中的医生、诊所和护理服务。在大多数西方国家，对于健康的人来说医生和社区诊所是他们和医疗系统的第一个接触点。社区医生和诊所提供日常的医疗服务。他们还提供检伤分类服务，这指的是那些需要在医院的专门科室进一步的治疗。社区护理在人们家中提供临终关怀和长期的护理。可以私下或公开资助护理服务，而提供护理服务水平是由病人的情况和支付人的财力决定的。

通常和社区医生咨询的时间大约有10min，在这期间医生必须听取和记录病史、测量生命体征并做出诊断。由于时间限制，诊断技术必须是快速和容易使用的。目前，在一个典型的医生的办公室里仅有的技术是电子健康档案（EHR）系统、数字温度计、数字血压计和各种一次性检测试剂盒。这是非常符合医疗反应诊断模型的。可以更全面地使用科技来提高社区护理服务的质量和能力：

- 可以在家中使用这些技术，以临床应用和自我诊断试剂的形式来获得生命体征和其他生物医学指标。这些数据可以与私人医生共享或者使用远程医疗做出诊断。在未来，诊断甚至可能是自动化的，从而避免因为简单疾病而去拜访医生，如感冒、流感、耳痛等。这些技术将在本章的后面讨论。
- 在医务室，即时检测可以通过避免送样检测以减少诊断时间。自动化测试和诸如血压计和数字温度计一起，使得医生可以在测量进行的同时记录病人的

病史。

- 医生办公室也起到减少医院负担的作用。传感器技术成本的下降使得许多医院门诊服务，如凝血功能的监测，可以在社区开展。社区实践也可以是添加和拆卸诊断设备的一个切入点，如动态心电图监测和动态血压监测。通过使用安全的数据共享技术可以与医院专家共享从这些设备中获得的数据，并且如果有需要，可以安排当面就诊。
- 传感器和非传感器技术，包括电子健康档案，可以给患者对自身健康的所有权。患者可以自己寻找医生，因为他们可以将他们的完整病史和传感器数据信息提供给医生。患者也可以从零售健康诊所获得医疗服务。这样的诊所能在非传统的环境中提供健康服务，像药店、大卖场和其他非医疗场所。
- 我们期待社区医生能够精通多个学科并且能够和不断变化的疾病、诊断和治疗方法保持同步。分析多传感器、无传感器的输入和不采用特定的标准交叉引用这些输入来获得结果，这些工作非常适合计算机完成。社区医生可以利用这些设备来诊断疾病，从而使他们免于寻找信息、提供服务和诊断。
- 社区护士拜访家中的病人，为他们提供护理并监测他们的健康状况。社区护士进行简单的生命体征监测确定患者的体重、心率和血压。这些测量工作的大部分目前可以采取以家庭为基础的临床设备或者远程监控设备进行，而不需要护士在旁边。这使得社区护士可以优化他们的工作表，去优先拜访那些最需要护理的，并去除检查身体状况良好人的拜访计划。
- 社区护士为很小一部分患者提供临终关怀和长期护理。在这些情况下使用的技术根据患者的病情的不同而有所区别。病人需要透析，但是他病得太严重不能随意移动，可能在他们的家里需要一台有医院品质的透析机。另一方面，护士照顾摔倒的病人可能根本不需要使用任何技术。

9.5 基于家庭的临床应用

无论是从商业还是研究角度来看，家庭医疗服务在过去的十年中做出了重大努力。这些工作主要集中在对慢性病的管理上，如慢性阻塞性肺病、充血性心力衰竭和糖尿病。然而，最初的重点已扩大到其他领域，如术后护理、中风康复、健康监测与预警（例如穿戴式跌倒探测器）。临床分级传感在为病人提供可靠的生理和生物监测中起着重要的作用。

面向临床护理的技术可以分为两类：病人监测传感器和病人运动传感器，见表 9-2。病人监测传感器测量一个人的生理和生物特性，并且存储或对数据做出反应，从而体现支持应用程序的功能。这种形式的传感需要直接与人体接触，或者通过采集样品，如血液，从而用于测试。病人运动传感器，如被动红外（PIR）运动传感器（可以检测一个人进入或离开一个房间）和计步器（计算步数）观察动作。行

为模式可以从这些数据作出推断，异常的模式则会触发警报。运动数据可以通过与人体直接接触检测到，例如计步器，或是通过使用环境传感器，如被动红外运动传感器，将其连接到目标所在的环境。可穿戴式运动传感器是与人直接接触的，因此可以准确地测量人的运动，不用考虑位置或他人的存在。在人们忘记连接传感器或是连接不正确的情况下，环境解决方案是比较理想的。但是，环境传感器安装在固定位置，如果一个人在另外的位置，它就不能传感到这个人的情况。

表 9-2　临床应用中的家用传感器

病人的监测	测量的对象
红外测温仪	体温
肺功能 -肺活量计 -峰流速仪	FVC（用力肺活量），FEV（用力呼气量），PEF（呼气流量峰值）
脉搏血氧仪	血液氧合
血压计	收缩压/舒张压
心电图	心脏的电活动
血糖仪	血糖水平
脂肪测量器	体脂百分比
体重秤	体重
血红蛋白光度计	血红蛋白浓度——测量贫血
PT/INR 仪表	前凝血酶时间（PT）以及其衍生的凝血酶原比率（PR）测量和国际标准化比值（INR）；长期被华法林（warfarin）使用者使用
喷雾器/药物输送喷雾器	吸入模式 通过可控的喷雾器输送药物
无线电频率识别（RFID）	对象的交互——日常生活活动
压力传感器	床位使用
加速计	加速度——跌倒监测 四肢运动——康复 计步——计步器
陀螺仪	角速度——跌倒监测 四肢运动——康复
磁力仪	体位——跌倒监测
PIR	房间占用情况

具有临床级别传感的远程医疗技术能够提供的预期效益驱使我们发展这项技术，从而提供支持和监督，而且这项技术不需要临床专家。通过减少费时间的面对面咨询、多余的医生的拜访，提供早期检测和对不良健康事件的响应措施，这些都可以减少供应商和个人的医疗费用。此外，传感器技术也可以通知护理人员病人行为模式或身体状况的改变，这些变化可能没有被病人报告或者注意到，但是这种身体状况却可能是即将发生的健康事件的预警。尽管具有这些预期效益，通过远程医疗实现的远程病人监控仍然是一个需要继续讨论的领域。研究结果表明患者受益程度、预计节约成本等都不一致。例如，一些研究显示患者的治疗效果明显改善（Miguel et al.，2013）；一些效果比较一般（Cox et al.，2012）；而其他的显示并没有作用（Cartwright et al.，2013）。远程医疗领域仍然是相对不成熟的，并且将继续在未来的十年里发展。随着我们接受和更好地了解个性化医疗，病人怎样以及什

么样的病人可以从这项技术中受益方面的知识将会不断增多。我们也将了解这项技术何时不适合于病人，意识到要在医疗领域取得实际的效益还需要结构性的变化。使用一种数据驱动的远程病人监控的方法，这需要时间来实现效益以及确定病人测量精细程度、范围和背景环境方面的弱点。尽管远程医疗的争论仍在持续，它的使用预计将在 2017 年增加 6 倍达到 180 万人。据估计，2012 年在全球范围内，约 30.8 万的慢性病患者采用远程医疗解决方案。这些主要是急性期后的患者，他们已经出院回到自己家。到 2017 年预期增加的远程医疗用户将由下列因素驱动：

- 政府卫生机构，他们想要减少出院后再住院率。
- 供应商提高病人护理质量的需求。
- 保险公司，他们想降低医疗费用。
- 病人的需求，病人逐渐接受采用个体健康传感设备进行监控的概念（InMedica，2013）。

家用型价格优惠的临床传感设备的使用持续增长。一个重要的推动因素是一直不断的小型化和低功耗的 MEMS 传感器件，再加上有线或无线标准的接口集成。例如，基于 MEMS 压力传感器可以在各种各样的血压监测仪中发现。它们也可以在药物吸入喷雾器的应用中发现。给药喷雾器在家庭环境中越来越多地用于治疗癌症、艾滋病、糖尿病和哮喘。成功操作这些设备的关键是 MEMS 压力传感器检测吸入压力低达 0.018lbf/in^2（1lbf/in^2 = 6894.76Pa）以及准确、快速的转换给药机制的响应能力。此外，MEMS 压力传感器可以用来检测人的吸入模式并且反过来调整给药模式，从而使效益最大化。

体温传感是另外一个领域，这个领域得益于低成本和精确的红外传感器的流行。该传感器的最常见的形式是耳朵鼓膜温度计，如图 9-3 所示。这些传感器的工作原理是耳膜发出的红外辐射。使用一种算法将接收到的红外辐射量转换成可以通过数字显示器显示的温度。这种形式的温度传感器由于其使用方便、成本较低以及结果精确而得到广泛使用。

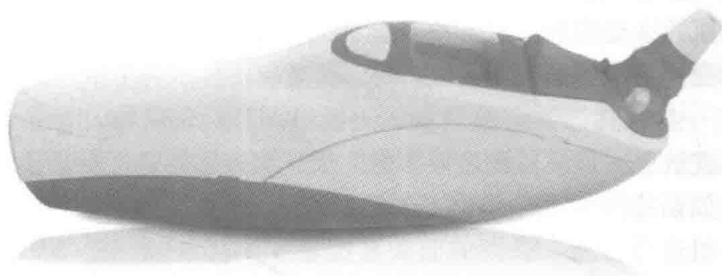


图 9-3　鼓膜温度计

9.5.1 慢性疾病管理

目前，远程医疗主要集中在慢性疾病管理上。慢性疾病，如糖尿病、心脏病、慢性阻塞性肺病和哮喘占据了医疗支出的70% ~80%。这些疾病的费用到2023年预计将达到4.3万亿美元（Versel，2012）。在美国每年70%的死因是慢性疾病，约1.33亿的美国人（大约2个成年人中就有1个）患有至少一种慢性疾病（NC-CDPHP，2009）。大多数在家中使用远程医疗系统的患者患有需要住院治疗的急性症状，他们在病情稳定后就出院了。充血性心力衰竭目前是远程医疗使用中的主要疾病，其次是慢性阻塞性肺病。然而，糖尿病将取代慢性阻塞性肺病作为远程医疗用户的第二大分组。糖尿病患者的家庭远程监控将支持一个更结构化的方法来监测和管理数据。护理人员和病人可以在任何时间、任何地点通过多种设备访问数据，包括智能手机。他们可以访问历史数据，更好地了解生活方式的选择是如何积极地或消极地影响数据变化的，这是为了更好地管理自己的病情（Mearian，2013）。

从传感的角度来看，慢性疾病管理面临着众多的挑战。传感器必须能够可靠地、高精度地监测病人的生命体征。检测必须通过有线或无线连接可靠地传输。从测量源到存储点对于传感器读数应该有充分的可追溯性。传感器应该是低功耗的，并且必须能够用标准碱性电池运行几个月或几年。尽管可以使用可充电电池，但是对于目标人群，这又增加了复杂性。这些特性目前是通过在临床环境中可以找到的标准的半移动离散传感器完成的。许多用于慢性疾病监测的临床传感器要求患者在测量过程中积极使用该设备，在某些情况下将数据记录到设备，如智能手机（如糖尿病患者测量）。

更加微型的、便宜的传感器和智能手机技术的出现已经开始提供新的、更加灵活的慢性疾病管理的远程医疗解决方案。在这一领域的新兴趋势包括以下几点：

- 智能服装的解决方案使简单和准确的生物特征参数的连续监测得以实现。例如，EU Chronius 项目开发了一种智能T恤监测慢性阻塞性肺病和慢性肾病（CKD）患者。这件T恤以心脏、呼吸和活动监测传感器为特点，它连接到智能手机上实现数据汇总、处理和传输。该系统已成功地在西班牙和英国对慢性阻塞性肺病和慢性肾病患者进行了两次实验（Pasolini，2012）。

- 智能、一次性传感器芯片（patches），如日本 Sano Intelligence 公司开发的传感器，粘在皮肤上并连续监测血液参数7天。该传感器通过测量参数免除了血液测试的需要，如葡萄糖和钾的水平，这通常需要一个全血测量仪器获得。数据无线传输至智能手机进行分析、长期的监测和报警探测（Schwartz，2012）。众多动态血糖仪（CGM）目前市场有售，如 Medronics Guardian 实时 CGM 系统和 Dexcom SEVEN Plus。此外，来自 Abbot Diagnostics 的 Freestyle Navigator 在2009年发布。然而，由于 Abbot 公司前后报道不一致的原因，2010年该产品撤出了美国市场。该产品在美国以外的7个国家继续销售（Gilles，2011）。CGM 系统比传统的血糖监

测仪更贵，成本支出1000~2000美元在测量仪器上，加上每月可能需要支出额外几百美元的传感器。这些都不是为了日常监测或长期生活自我护理，而是为了跟踪血糖水平的趋势。这些数据应该由病人的卫生保健团队使用以在必要的时候修改治疗方案，从而更好地优化血糖控制（WebMD，2012）。CGM 设备被认为是利润较小的市场，然而，在欧洲和美国，仪器设备市场正在快速成长，预计到2018年达到数亿美元（SBWire，2013）。

• 测量新的被测量，正如 Podimetrics（一个刚刚成立的公司，专注于糖尿病并发症而不是血糖检测）所展示的。Podimetrics 鞋垫技术检测糖尿病早期足溃疡，这是下肢截肢的主要原因。传感器鞋垫放在病人的鞋中并且采集他们脚上的血流数据。这些数据被传送到一个基于云计算的服务上进行处理。对潜在问题的警报发送到患者和他们的临床医生（Podimetrics，2013）。

9.5.2　用于研究的不定期监测

这种类型的传感器是用来在特定的期间内捕捉特定的生理（血压、EKG/ECG）和生化指标（血糖水平）。它是用于研究的，以追踪疾病的进展，或是监测从一个特定医疗事件中的恢复情况。在心血管监测领域，心脏监测仪也称动态心电图机（Holter），已被广泛用于诊断，特别是对于心律失常患者和有心源性晕厥（由于不规则的心率而眩晕）的老年人。这些监测器通常通过连接到胸部的电极在两个或三个通道上显示心电信号。聚合单元（或监测器）记录心电信号并将其存储在闪存设备以用于监测后的分析。许多 Holter 心脏监测仪还具有一个“病人按钮”，可以使病人在关键点按下按钮以进行记录标记，比如感觉不适、晕眩或是呼吸急促、服用药物等。这使得医生能够在分析信号时迅速识别这些有意义的区域。常规监测周期为24~48h。尽管 Holter 心脏监测仪的形式相对紧凑（大约相当于智能手机的大小），可以佩戴在脖子上或放在衬衫口袋里，但是它还是有点不方便。

下一代心脏监测器是基于表皮传感贴片式结构（“智能创可贴”）概念的。Corventis 开发了一个称为 Nuvant 移动心电遥感系统，它的特点是一个单独的贴片可以测量心率、呼吸速率、体温、移动和心脏的间质液水平。贴片具有可以连接到网关的蓝牙无线，用于传输数据到监测心律失常的监测中心。这种传感器也可以用来监测 COPD 患者，因为它具有测量组织液水平的能力。相似地，来自 Intelesens 的产品 Zensor 提供了生命体征的监测，如图9-4所示。这个紧凑的贴片器件集成了数据采集的诊断级别的三导联心电图功能，以及聚合数据处理，可以检测心律失常。数据通过 Wi-Fi 无线传输到远程数据库。Intelesens 系统的一个关键特征是贴片的生物相容性，它在失效之前，患者可以戴上它保持高达七天的时间（Intelesens，2013）。

在病人家中，血压计越来越多地被用来作为一种获取动态血压（ABPM）读数超过24h或48h的无创性方法。许多研究表明，超过24h的血压检测提供比临床环



图9-4 Intelesens的产品Zensor提供的动态生命体征监测（经Intelesens许可）

境中一次性检测更为准确的对血压的反映。除了检测高血压和低血压，动态血压监测也可用于检测器官损害，如左心室肥厚、性功能障碍和自主神经功能障碍（Rull，2010）。有两种用于测量动态血压的技术：超过24h的间歇测量和连续波形分析。以前的设备大型、笨重并且不易穿戴，特别是对老年人，但是现在的设备大小与带臂袖的心电图动态心电监测仪是相似的。现在许多具有在监测过程中采用蓝牙连接进行数据传输的功能。最近，市场上出现了许多可以测量手腕血压的仪器。一些研究报告表明，这些仪器数据的精度与上臂动态监测获得的是相当的（Uen et al.，2009）。但是腕式血压测量是有争议的，因而目前这种方法尚未被欧洲高血压学会和美国心脏协会推荐。与这些设备相关的某些问题都可能会导致不精确，如与心脏相关不正确的体位，在两动脉（桡动脉和尺动脉）的血压测量，以及外周脉搏波失真（Parati et al.，2010）（Anderson，2010）。

9.5.3 活动和行为的监测

无处不在的传感的概念是基于分布式、网络化的传感器，这种传感器监测用户的活动同时保持对用户的透明（Ning，2013）。对于行为监测，无线传感器和其他方法如RFID用于探测人类和他们的环境之间的相互作用。行为监测引起了广泛的注意，因为它可以为临床医生和护理人员提供在家庭环境下患者的客观情况。行为

信息使得临床医生可以通过追踪个体完成日常生活活动能力（ADL）来确定个体是否能够独立生活。这个数据也可以通过行为模式的变化用来识别疾病的早期症状，如老年痴呆症或糖尿病。可靠和准确的行为信息使得家庭医生或公共卫生专业人员可以询问了解病人的病史，从而为病人就诊带来好处。传感器也可以用来实现支持技术。例如，使用在一个厨房环境的红外传感器可以检测什么时候有人在那里，并且 RFID 标签和阅读器可以识别他们使用的对象。这些数据可以用来驱动信号（音频、视频或视觉）通过任务中的每一步来帮助使用者，如准备一顿饭（Stanley et al.，2011）。

不需要安装专用传感器的另一种行为监控的方法是基于智能仪表数据的使用。这些数据可以用来识别模式，如烹饪、睡觉、家里没人等。检测这些事件的能力使得智能仪表很有可能作为基本的健康监测的仪器，特别是对老年人。随着智能仪表在未来五年里的普及，将可以利用这些数据进行大规模的行为监测（Lisovich et al.，2010）。但是，诸如隐私、数据保护这些类似的问题在这些功能可以推出之前需要得到解决（McKenna et al.，2012）。

注：智能仪表一般检测电信号，但它们也可以检测水或气体。它们的嵌入式智能，使它们能够在规定的时间（比如每5min）记录消耗的电能，以及把那些信息反馈给能量供应者用于监控和记账。许多智能仪表也可以与家庭显示装置进行无线通信，这使得业主可以接近实时地监控仪器电源的消耗情况。

这种类型的传感技术的显著缺点是缺乏隐私保护。其他传感系统，如那些用于慢性疾病管理的传感系统，提供健康状况的信息，当然，这也会有一些关于隐私保护的思考。但这不像追踪你在夜间去厕所的次数或者你是否决定一直待在床上直到下午那样侵害隐私。因此，重要的是这种传感系统的使用是在自愿的基础上，而且对数据的访问进行严格控制和管理。当然，辅助生活社区可以有效避免隐私的损失及降低保持独立性和避免隐私泄露而付出的花费。对许多人来说，为了控制隐私的泄露而待在自己家中是值得的。

目前很多研究领域开展了结合无线传感器的小规模辅助生活技术解决方案。但是到目前为止，还没有进行大规模的高达数百或数千的传感器网络的深入研究。大规模使用的障碍主要在于技术和经济方面的复杂性，以及组织和医疗的保守。必须解决的一个关键的限制是病人的电子健康档案（EHR）。这些都是连接辅助生活型数据集与传统的医院和社区记录的关键。这些不同的数据集的完整描述在任何时刻记录病人的医疗过程时都是至关重要的。只有这样医疗服务策略才能保证患者最大的受益。有一些问题是与电子病历的使用相关的。其中最关键的问题是谁持有数据（Stafford，2010）。我们需要如下问题的答案：

- 是病人、医生还是医院持有数据？
- 谁有权访问数据？保险公司和国家卫生部门有吗？

- 记录可以从一个医院转移到另一个吗？从一国到另一国吗？
- 应该存储什么类型的数据以及以什么格式存储？这些记录在接入系统之间可以相互操作吗？

这些都是具有挑战性的问题，在电子病历变得更加普及之前需要得到答案。通过电子病历获取的人口水平的数据有可能带来巨大的好处，尤其是在个人医疗领域。像个性化医学欧洲联盟这样的组织正在与政策制定者共同开发监管框架，以使得研究人员和医生能在同一国家内或者跨国最终全面使用和获取这些记录，实现它们的价值（euapm. eu）。

辅助生活技术要想获得长远的成功，它们必须能够驱动一个“闭环”系统。闭环意味着从家庭环境中获得的数据驱使对临床决策支持系统做出合适的响应，从而改善健康、病人的治疗效果以及降低成本。这个目标是一项发展中的工作并且需要多年的试验和修正，去实现有形的、可量化的、可持续的效益。

除了活动追踪，其他类型的应用包括跌倒检测、药物跟踪、体力活动和社会参与。跌倒检测，通过使用穿在身上的传感器，是一个行之有效的市场。最初的跌倒检测的产品依赖于一个单一的传感形式，比如一个三轴加速度计。它们的缺点是出错率较高，这是由于选择性差，例如，在区分迅速坐下和跌倒在地板上存在困难。目前的产品使用多传感的方法，结合加速度计、陀螺仪和磁力计，以降低出错率。有些设备还具有在跌倒发生的时候手机网络连接自动报警呼叫中心的功能。当跌倒导致意识丧失的时候，这个功能是非常有用的。像手杖、助行架这些步行辅助工具，在老年人中是很常见的，并且引起了研究人员的关注。助行架中惯性传感器的加入已经在文献中报道对关键的步态特征的敏感性和特异性很高，比如脚跟和脚趾活动。行走的稳定性差可能表明行走人本身的稳定性差（Alwan，2009）。

活动追踪已经开始在老年痴呆症护理中发挥作用。如果需要的话，病人戴着的 GPS 标签使得护理人员可以通过一个基于 Web 的应用程序追踪他们的位置。2012 年，GTX 公司推出了 GPS 智能鞋，它追踪远离家门的患者。这些设备不仅对护理人员是有用的，同时对帮助患者自身也是有益的。该系统可用于限定病人应该驻留的区域，并且如果病人离开这个区域就触发警报。这种形式的监测可以提高患者自由、活动性和独立水平。

活动性监测在手术后支持上也可以发挥作用。穿戴式传感器解决方案，包含惯性和/或生理传感器可以帮助量化恢复状况。连续的家中行为数据比在医院的一次性检测更有用，在医院病人可能会为医生“表演”，结果并不能对他们的病情作出真实的反映。无论病人的活动机能是否受损、正在恢复，还是已恢复正常，活动监测传感器都是很有用的。它可以用于确定患者是否已经恢复了正常的行走、睡眠、运动等模式。异常活动模式可能表明在恢复过程中存在问题。e - AR 传感器是由英国帝国理工学院研制的，用于评估术后步态障碍的。这个传感器的模块包含一个三轴加速度计，它的重量只有 7.4g，是戴在耳朵上的。它是用来在病人家中监测

功能恢复的（Atallah et al.，2013）。其他的方法包括使用地板上的压敏传感器监测平衡和稳定性（Taylor et al.，2012），以及使用超声波传感器来监测床出口或站坐转换来实现活动性趋势监测（Pouliot et al.，2012）。

9.5.4 生物力学康复

穿戴式传感器在家庭康复中的使用是一个新兴的医疗应用领域（Patel et al.，2012）。这些虚拟现实的应用通常由穿戴式传感器、交互式软件和病人实时的表现组成。这种现代的康复方法对于病人是很有趣的，并且对病人的心理和生理都是有益的。为病人提供生物反馈，对用户来说既是激励也是奖励，并且鼓励遵守该计划。除了在虚拟现实期间监测生物力学性能，传感也可以用来量化活动水平、康复率和期间外的生理健康水平。这提供了对病人状况更全面的展示，并且可以在早期用于发现潜在的并发症。这些类型的传感器的应用需求将随着全球老龄化和肥胖的增加而增加。基于传感器的康复通常用于以下情况：

- 监测术后恢复，如关节复位后的运动范围。
- 监测康复计划中的病人的表现和进展，例如，一个中风后或跌倒后的康复计划。

手术后的应用通常是基于一个或多个惯性穿戴式传感器：

- 西班牙电信公司的 Rehabitic 产品使用 SHIMMER 惯性传感器使膝置复位患者在家中进行术后康复计划。病人只需要将 SHIMMER 传感器连接在受影响的膝关节的两侧。传感器的数据通过无线传递到触屏 PC 的应用程序上，这个 PC 通过一个预先确定的治疗过程提醒病人。视觉反馈是以屏幕上的头像的形式提供给病人的，这展现实时运动情况，并且提示违反目标的表现。医生可以远程实时跟踪治疗过程或者离线查看数据（Smith，2012）。
- 来自加拿大运动健康公司的 Smart Step 是一个惯性传感器装置，戴在踝关节上监测和提供外科手术后治疗指导。这个传感器装置可以提供基于正确的或不正确的步态识别的听觉反馈。它也被用于中风康复和像帕金森这样的疾病（Motion-Health，2013）。

在全球基础上每年大约有 1600 万人初次中风，导致 570 万人死亡（Carlo，2009）。在美国，据估计每年 795000 人中风，花费估计 386 亿美元（CDCP，2013）。中风是导致长期残疾的主要原因，大约有一半的中风幸存者处于某种程度的身体上或认知上的损伤。居家中风康复使用的传感器在工业界和学术界多年来一直是一个重要研究领域。在将穿戴式惯性传感器（Chee Kian et al.，2010）用于上下肢康复方面的研究人员付出了很大的努力。最近的研究工作包括传感技术，如柔性传感器和压力传感器有可能集成到服装上（Bin Ambar et al.，2012）：

- 飞利浦中风康复研究试验程序通过使用触屏 PC 进行一系列规定的练习来训练病人。穿戴式无线惯性传感器记录病人的运动并把数据上传到 PC。数据分析所

需的运动目标的偏差，然后把反馈提供给病人。理疗师也可以远程地检查病人并且更新运动计划的目标。

- 中风康复的最近的进展是基于低成本的游戏平台的可利用性，它将惯性传感器集成到控制器中。研究表明，以游戏为基础的治疗方法令人愉快，并且和常规治疗带给病人的改善是相当的，而且没有任何重大的安全风险（Joo et al.，2010）。

9.5.5 聚合与管理

见表9-2，有各种各样监测病人在家中的健康和活动的传感方案。这些传感器可用于分散的、没有外部连接的独立设备，也可以用于有连接的设备。使用有线（USB，例如）或无线（蓝牙，Wi-Fi，或ZigBee）接口将有连接的传感器设备连接到一个较大的病人监护系统。这些监护系统通常由一个家用的聚合模块组成，它可以处理、显示、情景化以及安全地将传感器数据和其他定性数据传输到远程后端，用于临床准入和检查。病人监护系统的架构如图9-5所示。这些多功能的聚合设备最初是定制的PC，如护理创新指南和博世健康伴侣系统，或者是定制的机顶盒和电视机一起使用，如飞利浦医疗的Motiva。最近，软件产品（如护理创新指南）已经和定制的硬件分离，可以运行在标准的、现成的笔记本电脑或平板电脑上。在这种模式下，病人管理软件完全控制计算机设备，从而防止用户任何意外或故意的对软件的改动。这使终端用户或服务提供者可以自由安排未使用的计算机设备作为健康聚合模块，或是选择新的形式，如智能手机或平板电脑，因为它们很容

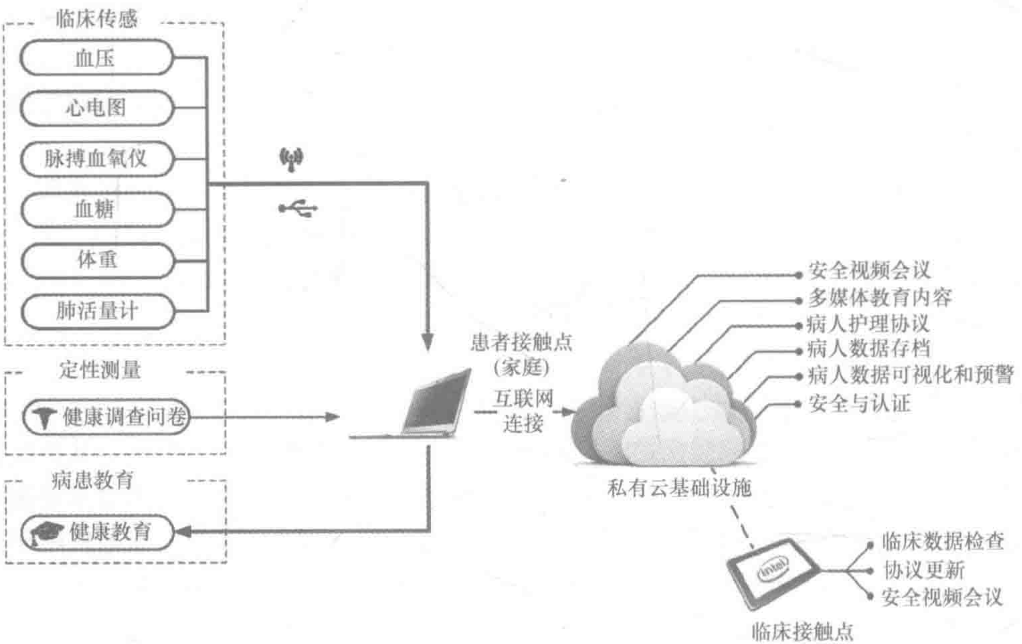


图9-5 家用慢性疾病管理系统的体系结构

易获得。健康通信标准的出现，比如 Continua，保证任何兼容的传感器设备可以无缝替换为另一个相同类型的传感器。

高通公司提出了临床传感器数据聚合的一种不同的方法。它的 2net Hub 是一个插入到插座中的固定的远程医疗中心或网关。该器件集成了蓝牙、ANT +、Wi - Fi 和 USB，可以与临床传感器和其他外部设备无线通信。这个中心还具有蜂窝连接，允许它将数据发送到 2net 平台（基于云计算的系统）。2net 平台提供了与不同的医疗设备和应用互相操作的功能。这也使传感器和医疗设备终端到终端的无线连接成为可能，并且为病人和他们的医生提供安全的生物统计数据访问。一种针对嵌入式设备的 2net 网关可以直接构建到临床传感器上。此外，软件模块可以用到移动设备上，如智能手机和平板电脑，作为 2net 平台的网关。当两者结合时，2net 网关和 2net 平台提供公司建立家庭健康监测服务的基础，而无需进行重大的集成和数据管理任务。类似地，Verizon 曾与 Entra 医疗健康系统合作开发自己的基于云计算的平台，这有利于医疗设备连接到一个共同的诊断数据库（Fitchard，2011）。

9.5.6　智能手机作为医疗平台

智能手机通常用作健康应用的传感器聚集平台，如在第 10 章介绍的。此功能目前正在扩展到医疗领域，提供家用的健康监测服务。智能手机的应用程序有许多共同的组件：连接到传感器设备的有线或无线的接口，数据存储、分析、显示以及向医生或服务器转发数据的设备。

像第 4 章中讨论的那样，智能手机拥有超过定制聚合器的许多优点。许多人都已经拥有智能手机，所以病人只需要支付医疗传感器设备和任何基于云的数据服务的费用。智能手机本身具有与互联网连接、处理和显示的功能，并且它们可以连接到内部和外部的传感器来提供和健康相关的数据检测。在基于云计算的服务上，传感器和数据可以存档在智能手机中，或者与家人、朋友或医生共享。个人可以使用软件应用查看他们健康数据的微观和宏观的发展趋势。

最初，定制的医疗应用程序是为特定设备接口开发的，但趋势逐渐朝着与多个传感器设备接口连接的应用程序发展，如 ZephyrLIFT 应用（www. zephyr - technology. com）。类似地，传感器制造商面向外部应用程序开发者开放其通信接口，提供给消费者为他们的医疗传感器设备选择免费或付费的应用。医疗应用通常使用在以下领域，下列清单很可能随着健康传感器和智能手机的不断发展而变化：

- 血压监测：例如，iHealth 实验室具有一系列创新的使用智能手机或平板电脑监测血压的产品。一种选择是放在上臂的无线血压监测器。来自臂袖的数据无线传输到患者 iPhone 上运行的 iHealth 移动应用程序，如图 9-6a 所示。应用程序可以显示用户当前的收缩压和舒张压读数、心率、脉搏波以及测量时间。该应用还允许用户将每日的结果与他们的历史平均水平进行对比，采用世界卫生组织（WHO）分类为读数提供分类背景。也有一个集成的云服务，用户数据可以进行备份和安全

地存储，无论在哪里都可以让用户访问自己的数据。另一种选择是腕袖与智能手机无线连接运行如图 9-6b 所示的 iHealth 应用程序。腕袖单元还具有一个运动传感器通过探测最佳的手腕位置以提高测量的准确度，这有助于用户更准确地对血压读数。还有与血压板连接的上臂袖带，如图 9-6c 所示。一种基于 iOS 的设备（智能手机或平板电脑）则连接到血压板上，把这个设备转变成为血压监测器。类似的血压板和智能手机的组合可从如 Withings 和 Verdian 医疗公司获得。血压监测是从智能手机提供的背景数据获益的应用程序领域中的一员，比如，重体力作业后立即测量血压会导致错误的数据。



a)　　b)

c)

图 9-6　血压计与智能手机和平板电脑连接（经 iHealth 实验室允许使用）

● 心率监测：例如，ZephyrLIFE iOS 应用程序提供数据处理和远程数据传输服务。这个应用通过蓝牙接口连接到 Zephyr 的 BioPatch 模块以提供心脏监测，包括

心率、R-R间期、呼吸速率和心电图。这款应用程序还可以无线接口到其他医疗设备，包括脉搏血氧仪、体重秤、血压计和血糖仪。Zephyr BioPatch 在数量上和它所提供的心血管参数的质量上不同于基本的用于健康应用的心率传感器。智能手机应用和外部卫生级心血管传感器可能在不久的将来取代分布式动态心电监测设备成为诊断设备。

- 糖尿病监测：智能手机是理想的糖尿病管理工具，它能实现对日志和基于传感器的信息频繁访问，显示微观与宏观的趋势，并且和医生共享聚合的数据。各种各样通过使用智能手机监测血糖水平的硬件解决方案已经被提出。包括手动地为一个应用程序输入血糖仪读数，使用 Glooko MeterSync 线缆将标准血糖仪连接到智能手机，制造智能手机血糖仪的附属设备，如 Sanofi 的 iBGStar，或是制造一个集成血糖仪功能的智能手机设备，如 LifeWatch V 智能手机。和这些硬件接口相关联的应用程序具有像先前描述的其他应用的数据存储、分析、显示以及数据共享的功能。

家庭健康监测是智能手机技术一个令人兴奋的应用，并且随着智能手机的计算能力不断提高，外部传感器变得越来越容易集成，主板上的传感器和传感器中枢性能的提高，以及移动网络的能力不断发展，实践应用将会不断发展。

9.6 自我护理诊断试剂盒

正如我们已经讨论的，人们越来越积极管理自己的健康。这导致自我护理诊断试剂盒在家中使用得越来越多了。各种动机驱使人们使用试剂盒，包括人们的自我授权、方便、隐私、匿名性、“疑病症”的效果以及经济因素的考虑。积极的消费理念在过去几十年不断变化，现在正在渗透到个人健康领域，部分原因是因为现成的试剂盒很容易可以从药店或网络上获得。家用诊断试剂盒使用不到四年。1977年，出现了第一个非处方早孕测试。当时，专业人员和公众围绕这项测试有着激烈的争论（Pray，2010）。许多人担心潜在的社会影响，特别是对年轻女性的影响。这样的争论现在很大程度上局限于历史书籍，并且转向对疾病、传染病和血液化学测试的使用进行讨论。

随着自我护理诊断试剂盒的流行，关注甚至警告的声音也多了起来。如果正确使用，FDA 批准的试剂盒应该和实验室测试一样准确，这是在可控的条件下进行的。但是，由于对于样本的采集和数据的解释相关的说明太少，测试在不同的家庭中进行的方式有着显著的不同。这种差异可能导致错误的读数，误报（如前列腺特异性抗原（PSA）），并造成一种虚假的安全感（例如结肠癌筛查）。专家认为家庭测试往往是在浪费钱。一旦病人来到医院，医生很有可能重复病人在家中进行过的测试（NHS，2011）。

胆固醇水平试剂盒是目前市场上最受欢迎的家庭试剂盒之一。但是，结果差异显著，特别是如果被测者不空腹进行测试。另一个常见的问题是不遵从采样说明。胆固醇测试中，人们往往挤手指取血到试纸上，这可能会影响结果的准确性。

在某些情况下，特定的测试的科学价值是非常有争议的。食物过敏可能会导致危及生命的休克反应，如严重的呼吸困难、舌头肿胀，而食物不耐受的症状从轻微不适到腹泻都有可能发生。食物过敏反应会引起免疫球蛋白（IgE）抗体产物形式的免疫反应。食物过敏试剂盒设计用来检测和量化这种以抗体为基础的免疫反应。一些专家认为，这些结果是有问题的，它们往往依赖于过敏性反应的强度。食物不耐受试剂盒也是可以使用的，尽管食物不耐受不会引起全面的过敏反应，它们仍然适用同样的免疫反应原理鉴别食物不耐受。这种形式的测试几乎没有科学支持。一个简单的对可疑食品的试错法是大多数专家提出的鉴定食物不耐受的正常做法。

家庭测试缺乏相关的法律法规，如在第6章所介绍的。在美国，只有一些测试有FDA批准。一些测试可以由其他专业机构认证。例如，胆固醇测试可以由胆固醇参考方法实验室网络（CRMLN）认证。其他测试没有认证或是专家评审的科学依据。在未来的许多年内，监管和质量保证的匮乏将继续给家庭监控领域带来混乱和不确定因素。在此期间，一些实际的测试认证需要通过特定的机构或通过大量用户使用来确定实际的效果。

一些专家认为，廉价的测试不能提供足够多的真正有用的信息。有些人认为这是医疗机构的一个有限和过时的观点。随着我们朝着以病人为中心的医疗发展，可以说，患者所重视的方面，如便利性和隐私性，将会越来越重要，特别是当它涉及人们获得基本医疗的时候。任何测试的价值，尽管存在潜在的缺陷，也必须与未测试和不了解的潜在风险进行权衡。

通常用于家庭试剂盒的传感技术有以下三种：

- 酶/免疫学检测。
- 酶试纸（Clinistrip）。
- 色谱湿法化学。

9.6.1 酶/免疫学检测

家中使用的免疫检测试剂盒是基于酶联免疫吸附试验（ELISA）的。这项测试使用抗体和颜色的变化来确定液体样品（血、尿或唾液）中物质的存在。单克隆抗体，一种特异性单一的抗体，通常用在这些测试中。待测物质通常是一种抗原，它可以引起一种或更多的抗体反应。在直接免疫检测中，已经涂到塑料板上的凹槽中（也被称为微量滴定板，有一个或多个凹槽的平板，可以作为小试管）的抗原是由一种直接结合（依附）到一种酶（如辣根过氧化物酶（HRPO）、脲酶或碱性磷酸酶（AP））的抗体检测的。这也可以反过来，用一种涂覆到板子的凹槽上的抗

体和一种标记过的抗原来检测。当酶标记抗体加入到样本中时，检测抗原发生反应，并且防止抗体在固相（凹槽的墙壁）上和抗原结合。样本中加入的抗原（液相）和固相抗原竞相成为标记抗体。液相抗原浓度越高，两相之间的竞争越激烈。未结合的抗原和抗体酶结合物在洗涤步骤中除去。一经加入酶底物，颜色的亮度和样本中目标抗原浓度成反比（BIO - RAD，2013）。化学发光或荧光信号是确定抗原浓度两种不同的光学方法，但由于检测器的成本，一般不适合家庭使用。直接ELISA方法的变种包括间接ELISA、三明治ELISA（见图9-7）和竞争或抑制ELISA。这种形式的传感器是高度灵敏的，典型的检测范围是0.01～0.1ng，线性度约为99.7%（Jordan，2005）。

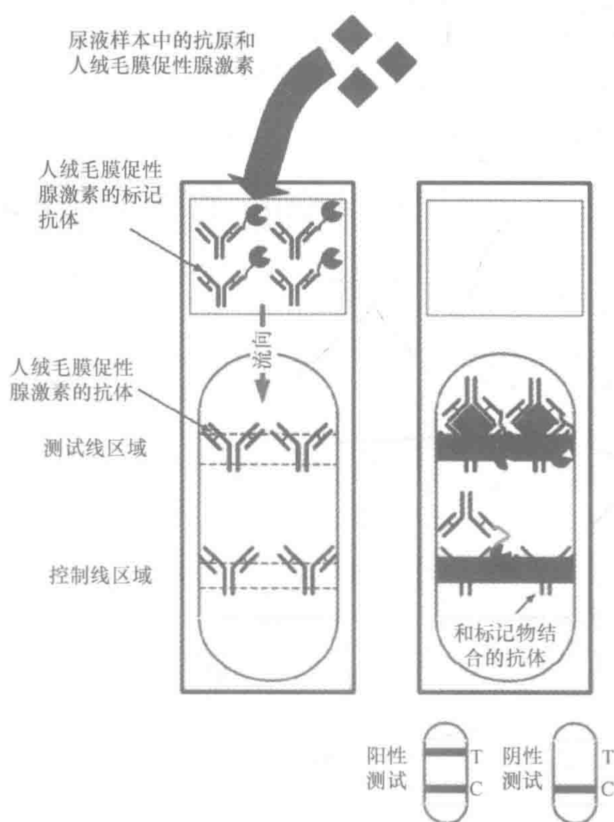


图9-7 基于三明治ELISA方法的家用怀孕测试

9.6.2 酶试纸

试纸或“浸棒”是家庭检测工具中一种很常见的方法，通常也使用于医院。它们提供了对各种情况进行反映的一种快速和廉价的机制，可能是生物相关的或化学相关的。尿糖棒，它最早出现在20世纪50年代，通常用于检测尿液中的葡萄

糖。尿糖棒包含两种酶，葡萄糖氧化酶和过氧化物酶，它被固定在纤维素垫上。这个纤维素垫是固定在一个约5～10mm宽和70～80mm长的塑料条上的。将样本施加到纤维素垫上，葡萄糖氧化酶催化葡萄糖和氧之间的反应，生成葡萄糖酸和过氧化氢。反过来，过氧化物酶催化过氧化氢和指示色素之间的反应，产生可见的颜色变化。这种颜色变化的亮度是和样品中葡萄糖的浓度成正比的。

9.6.3 色谱湿法化学

色谱湿法化学试纸可以检测尿液和唾液样本中各种各样的分析物。它们是由一种约5～10mm宽的用不同的化合物浸染过的塑料条组成的。被测样本中一种或多种分析物进行的化学反应，通常引起颜色变化，这种颜色变化是和目标分析物的浓度成比例的。例如，尿液样本中乙酰乙酸和丙酮形式的酮用于硝普钠的反应检测，产生紫色，如图9-8所示（Chronolab，2009）。

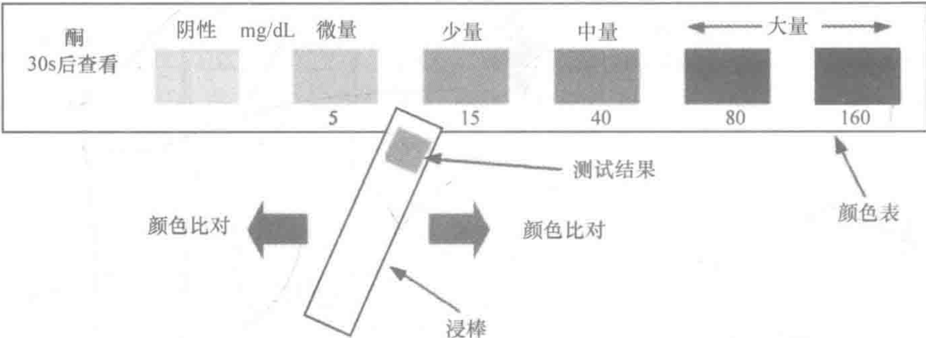


图9-8　使用浸棒检测尿液样本中的酮

9.6.4 家庭检测市场

自我诊断家用检测工具的市场动荡不定、不断变化。不断引进新的测试，而其他测试逐渐消失，由于其疗效和效用被科学界证明是无效的，或者随着科技发展变得过时。市场继续以每年7%～8%左右的速度增长，2013年销售预计达到56.8亿美元。目前收入主要以怀孕和胆固醇检测工具为主，约占85%～90%的销售份额，但是，随着其他测试获得消费者的青睐，销售份额会随着时间的推移而改变（Kelleher，2009）。表9-3列出了消费者目前在柜台或通过互联网可以购买到的家庭检测工具。各种各样的检测工具还提供实验室进行的家庭抽样分析并将结果反馈给消费者。这些测试不包括在表9-3中，因为它们不具备“传感”的能力。FDA最近批准的第一种HIV家庭测试，在测试结果呈阳性时，缺乏合适的支持机构和咨询而导致争议声越来越大。在不了解测试背景而产生的假阳性检测结果的情况下，临床支持对于这些测试结果的判断都是有价值的。

表 9-3 消费者家用健康试剂盒

分类	类型	症状或病因	描述
传染病	真菌型	酵母菌感染（念珠菌病）	尿液 pH 值的变化
	细菌型	膀胱炎（膀胱） 肾盂肾炎（肾） 幽门螺杆菌（胃） 沙眼	测量尿液中蛋白、亚硝酸盐或白血球（酯酶）——化学试剂试纸基于颜色亮度的检测 血液样本中细菌抗体的免疫测定
	病毒型	艾滋病	唾液中 HIV 抗体的免疫测定
血液化学	胆固醇	总胆固醇 低密度脂蛋白（LDL） 高密度脂蛋白（HDL） 甘油三酯	色谱化学试纸或生物传感（如基于酶的电流传感）。检测结果对于血液采集方法以及测试前空腹检测灵敏度高
	酮	糖尿病酮症酸中毒	基于酶的比色法或色谱化学试纸检测血液（乙酰乙酸或β－羟丁酸）或尿液（乙酰乙酸，或乙酰乙酸和丙酮）中的酮
	激素	激素不足 甲状腺功能亢进症或甲状腺功能减退症 库欣病 缺乏性欲	唾液、尿液和血液样本的色谱免疫分析法。测定雌二醇（E2）、孕酮（Pg）、睾酮（T）、DHEA－S、皮质醇水平、促甲状腺激素（TSH） 血清试验通常无法区分蛋白结合形式（无活性形式）和游离形式（生物活性），因此只能给出激素水平一个粗略的估计。尿液检测一般需要反复测试超过24h以获取准确的结果。唾液测试提供一个更好的对生物利用性或活性激素的指示
		更年期	色谱免疫分析法测定尿液中促卵泡激素（FSH）。高水平的 FSH 能表征更年期
	贫血	铁蛋白	免疫分析法（多克隆抗体/链霉菌抗生物素蛋白－过氧化物酶结合）测定血液中的铁蛋白水平。铁蛋白是铁贮藏蛋白，是缺铁性贫血的敏感指标
饮食	过敏症	鸡蛋 小麦 大豆 花生 海鲜 鱼 坚果 咖啡因	免疫球蛋白 E（IgE）抗体的免疫测定

（续）

分类	类型	症状或病因	描述
环境相关	过敏症	猫的皮屑 狗的皮屑 粉尘螨 草花粉	由于空气中的过敏源的免疫反应对全血中 IgE 抗体定性检测的免疫分析
疾病	乳糜泻病	谷蛋白	对免疫球蛋白 IgA 和/或 IgG 抗体的免疫分析。腹腔饮食中谷蛋白的存在会导致身体免疫系统产生抗体攻击小肠内壁
	结肠（胃肠道，癌症，克罗恩病）	便血	愈创木脂类便隐血试验（FOBT）-化学试纸检测氧化物酶活性 球蛋白或转铁蛋白的免疫分析
生育	排卵检测	黄体化激素（LH）	颜色指示免疫分析检测排卵期间尿液或血液中的升高的 LH 激素
妊娠	妊娠试验	人体绒毛膜促性腺激素（HCG）	测试通过尿液中 HCG 激素与单克隆抗体和指示剂/色素分子之间的结合 尿激素（HCG）
	羊膜检漏仪	羊水	带颜色指示的 pH 值敏感聚合物涂覆的聚酯带（护垫）
器官功能	前列腺疾病	前列腺特异性抗原（PSA）	免疫酶分析。当腺体增大或癌变时，PSA 会在血液中以较高浓度出现
	肾上腺	NaCl	在末端使用颜色指示的滴定法测定尿液中含盐水平
	肝	胆红素、尿胆素原	色谱湿法试剂测定尿液中胆红素、尿胆素原
药物	非法的	安非他命（提高速度） 巴比妥类（巴比妥类，镇静剂，红胶丸） 可卡因和纯可卡因 甲基苯丙胺（摇头丸） 阿片制剂（海洛因） 苯环己哌啶（天使粉） 大麻	针对具体药物的色谱湿法化学试纸测试尿液样本 免疫分析筛选试验
	处方药	止痛药 抗抑郁药 苯二氮平类药物 美沙酮	色谱化学试剂试纸测定羟考酮奥施康定维柯丁 TCA 三环抗抑郁剂（抗抑郁药） 镇静剂，如安定、羟基安定和硝基安定和氟硝安定

（续）

分类	类型	症状或病因	描述
酒类	呼吸 尿液	乙醇	燃料电池传感器 金属氧化物半导体传感器 试纸——在过氧化物酶和指示剂（如四甲基联苯胺（TMB））的存在下，通过醇氧化酶（ALOx）的乙醇转化，产生乙醛和变色的 TMB（被氧化）
吸烟	主动的 被动的	尼古丁	免疫分析检测唾液和尿液中的可铁宁（尼古丁的代谢产物）

9.6.5　家庭基因测试

直接面向消费者的基因检测是最近引起广泛注意的家庭诊断测试的一个领域。这种形式的测试目前不属于传感领域，这是因为样本在家里采集并送到实验室使用如聚合酶链反应（PCR）技术进行检测。但是，这是一个新兴的家庭检测市场领域。

让这种形式的测试成为主流遭到了相当大的反对声音。例如，旨在提供快速检测的路径基因公司（Pathway Genomics）和 Walgreens 公司之间计划中的合作伙伴关系招致国会和 FDA 的审查，导致计划立即破产（Wanner，2012）。许多家用的基因测试缺乏严谨的科学验证，并且不能捕捉到重要的检测相关信息，在预测风险的时候是需要这部分信息的（School，2010）。

然而，公众对于确定包括阿尔茨海默氏症、糖尿病和某些种类的癌症，如乳腺癌和卵巢癌（基于 BRCA1 和 BRCA2 基因的遗传性突变）在内的遗传风险有着很大的关注。我们想通过测试来确定是否存在遗传给儿童的风险，如囊胞性纤维症和家族黑蒙性白痴。最近的研究表明，一个正常健康的人平均拥有 400 种潜在的破坏性的 DNA 变异，其中两种有已知的相关的疾病性状。研究表明，在大多数情况下，这些变异的存在不足以导致疾病。疾病表达的诱导因素仍然是未知的（Xue et al.，2012）。很有可能是诸如生活方式和环境因素造成这些影响。这个领域仍将引起医生、政治家、病人权益团体以及有特定的家族病史的人们的激烈辩论。目前，我们对于基因表达和疾病风险的理解仍处于“见解丰富，信息贫乏”的状态。我们很有可能要花上几十年的时间才能弥补知识差距、实现基因组学的临床价值。

9.7　关键驱动因素和挑战

在医疗领域成功地使用传感器方面，仍然存在着各种各样组织上、技术上和终端用户的挑战和驱动因素。人口结构的变化，技术创新，以及反应式医疗成本正在推动家庭与社区使用健康监测，但是还存在着许多障碍，比如医疗系统为了实现传

感器技术的价值和效用所需要的组织上的变化，也有一些关键的问题需要解决，比如传感器技术的实用性以保证病人愿意配合。尽管存在这些挑战，基于传感技术提供新的更低成本的护理模式能力，在传感器技术的应用方面有不断增长的势头。这些护理模式也更适应患者的需求和生活方式。我们现在来更详细地了解一下关键驱动因素和挑战。

9.7.1 医疗系统方面的驱动因素和挑战

在诊断和护理病人方面，家庭监护将是比经常的临床诊断或健康出现问题后反应（目前的护理模式）成本更为低廉的方式。例如，通过连续家庭监测诊断不规则心律失常是比多次医院就诊或长期住院评估更为有效的。人们普遍认为，大多数疾病的早期检测和治疗使得成本更低并且结果更好。使用智能手机作为健康平台，通过穿戴式即时传感器或是集成在智能手机中的传感器，能够实现连续的健康监测。反过来，这将为即将到来的重大健康事件提供早期预警，如心脏病或其他重大疾病的发作。这样的功能将使得我们朝着预测型医疗发展，而不是目前占主导地位的应激式医疗。政治压力是朝着采用新式的、临床有效的监测、诊断或治疗策略发展的另一个关键的驱动因素，特别是当存在着显著的预期经济价值的时候。

医疗系统和技术之间的结合可能是具有挑战性的，尤其是在引进新技术、新协议或新的非临床环境的时候。家庭和社区型传感有希望实现所有这三个“新”的特点。然而医疗行业既复杂又保守，往往是缓慢地接受创新和变化。在采用新的治疗方案和技术之前，它们往往需要昂贵的纵向的随机对照试验来证明疗效。它们谨慎的方法可能有助于保护患者。但在许多方面，阻止患者接触新的技术和治疗可能比技术或治疗本身更加放大他们的健康风险。

第 6 章中介绍的监管体系，也给患者接触技术设置了一个屏障。尽管监管是代价高昂的、官僚的、耗时的行为，但是还是有必要保护脆弱的病人。一个不受监管的体系，例如家用检测工具和移动应用程序，可能误导患者造成危险的后果。一个跟得上快速发展的技术的新型监管体系是我们期盼已久的。个人医生也可能抵制改变，因为使用远程传感技术会使他们觉得不舒服。或者他们可能担心这些技术会增加临床评估、协议使用和对治疗计划和决策的透明度。

9.7.2 技术驱动因素和挑战

传感器，特别是可穿戴式传感器设备，最好是时尚的、不引人注目的、舒适的并且是无线的。新出现的各种各样的“创可贴”式传感器设备搭配智能手机可以解决这些需求（Kumar et al.，2011，Whitney，2010，Montalbano，2013）。但是，一些生理传感器的形式因素，如动态血压监测，由于其检测方法的物理需求，仍然是庞大的并且是侵入式的。可穿戴式传感解决方案需要适应个性化需求、个人喜好和习惯。传感器材料的生物相容性是一个重要的考虑因素。虽然已经在基本的材料

水平上做出了许多努力，仍然有许多工作要充分认识传感器接口与人体和皮肤在长期监测之间的关系。表皮传感器，如“智能皮肤”，有希望发展成可以穿戴几个星期或几个月而对病人的皮肤或周围组织无明显影响的传感器。植入式设备领域迄今已经取得重大进展。大多数植入物已经达到10～15年的正常使用寿命。

打破健康科技产业内的束缚仍然有许多工作需要去做。在传感器和设备之间往往缺乏互操作性，导致数据转移到不同的后端系统，使得对于消费者或护理人员不可能或是非常不方便去管理所有可用的数据。像Continua医疗联盟这些倡议有助于解决这些互操作性问题，并最终使远程临床检测更便宜和更有效。

在我们日常生活的许多方面，安全和隐私问题是无处不在的，比起其他方面，其中一些我们给予更高的优先级。医疗是并且很有可能一直是高优先领域中的一员。在安全技术方面，这取决于最薄弱的环节（人），一定要注意了解医疗中的传感在社会、民族和人口方面的影响。有人担心基因识别、第三方开发、“大哥大(big brother)”等问题。这些问题必须提前得到解决，并且在技术日益普及之前必须制定和商定相关政策。个人所有权和知情许可权，这些方面维护个人隐私与尊重个人的健康数据，必须得到保护。然而，个人也必须保护自己。因为人们使用传感来获取更多的有关他们自身的健康信息，他们应该知道以一种开放的、不受控制的方式共享该数据的影响。随着无线传感器网络日益普及，隐私需要被保护。

9.7.3　消费者驱动因素和挑战

对于传感器技术，病人既是推动者也是抑制者。一些患者会本能地抗拒新技术，特别是如果他们觉得这会导致与临床医生的个人接触减少。其他人接受新技术，是因为他们把它视为收集对他们正在经历的症状和问题方面的证据的一种机制。有些病人在得知自己的生命体征是正常的并且有人在观看他们的数据时候会感觉舒坦，而其他人可能是出于对最新最酷的技术装置的渴望。与大多数技术一样，易用性是至关重要的。使用传感器的经验不足，难以解释结果，或得到错误的读数可能会对病人对技术的看法产生负面影响并阻止后续使用。

随着越来越多的技术融合到医疗中，个人健康数据管理的复杂性会显著增加。人们不得不精通数据（见第5章）来理解他们的传感器测量结果意味着什么。他们也必须明白，孤立的个别量测不一定能显示他们的健康真实状况，但是如果能结合其他数据源就能提供大量的信息了。完整的数据视图对于提供测量的相关信息和验证对消费者有益是非常重要的。例如，积极的家庭测试结果可能因为不支持测量和额外的相关信息而是具有误导性的。因此在设计这样的技术的时候，很有必要考虑最终用户和不同环境。

因为新的传感器技术使我们更好地了解健康参数，所以我们必须谨慎地开发鲁棒因果模型。这对于基因标记尤其重要，它们本身并不一定意味着某人会患上特定的疾病。这是家庭基因试剂盒的关键弱点之一。许多人永远不会患上特定的疾病，

即使他们已被确定是有风险的。因此，即使不采取预防措施，不管怎样他们也不会患上某种疾病。一旦确定为具有特定的风险，他们通常会被特殊照料，或者他们会要求医生采取某种形式的治疗。这可能导致更高的成本并且减少预防性措施的经济效益。随着传感器技术的精度和我们对于如何拼凑来自不同个体信息能力的提高，我们将有更精确的工具来鉴别谁真的需要，并且可以从积极的治疗中获益。

9.8 基于传感器医疗应用的未来

当前的趋势显示，未来的医疗传感将会汇集众多领域——卫生、技术、时尚、服装和生活方式。随着健康消费的持续增长，人们希望他们的医疗设备更为美观，特别是非处方的监控设备。许多身体健康的人想通过使用方便的、非侵入式的、时尚的设备持续地追踪他们的健康状况。这一逐渐庞大的人群包括那些积极主动管理自身健康的人，以及那些担心媒体中最新报道的医疗恐慌的“疑病症”（或健康焦虑症）群体。患者慢慢开始了解在医疗健康领域中新兴的传感技术以及服务。将来，他们可能会需要针对他们处方的医疗疗法相类似的功能。这也将会造成患者和医疗专业人士之间的动态再平衡。许多人认为这是一个有积极意义的改善，因为在个人的决策过程中，这会对他们的健康产生更为积极的作用。人们接受的教育越来越好，因而会质疑对他们进行保健服务的人员，并对他们提出更多的需求。患者会需要更多的选择，并且会在与他们健康相关的问题的决策过程中发挥更为积极的作用。

接下来的十年随着个性化医疗朝着成为医疗实践标准的方向发展，个性化医疗的使用将会加速发展。“组学”技术的使用将会推动个性化医疗的发展，在这项技术中基因组信息将用来确定针对一个人最为有效的治疗方案。这将使我们不再使用以人口为中心的统计信息（通过这种方式我们可以看到治疗的平均效果），并朝着对症治疗并且根据个人的生物数据不断改善治疗方式的方向发展。这种方法通常被称为治疗诊断学，主要锁定在靶向药物治疗和伴随诊断测试上，从而改善个性化医疗的水平。测试是它不可分割的一部分，因为必须检测服用一种新药物的即时反应，并且根据测试结果优化病人的治疗方案。从确定哪些药物治疗是最有效的，到监测这些药物的疗效，传感技术在这种方法中发挥核心的作用。

从技术的角度来看，随着 MEMS 技术不断地发展而日渐集成的器件将严重影响传感技术的发展。传感器的尺寸不断地减小，使得它们可以满足患者的需求和期望。新型体表传感技术，如电子皮肤碎片或“智能皮肤传感器”（传感器逐个地粘贴到病人的皮肤上），使得医生不需要有创的方式就可以在任何地点监测生命体征。这项技术将成为网络物理系统新世界的一部分，在这里物理世界和网络世界以一种无缝自然的方式连接在一起。基于“智能创可贴”形式的传感器平台是这场旅途中的重要的第一步（Fangmin et al.，2012，Hoi-Jun et al.，2010）。

使用智能手机作为健康平台还将会有许多令人兴奋的进展。它们的普遍性和熟

悉度也将会见证智能手机更多地用于医疗传感和设备管理。主要的智能手机厂商越来越有兴趣提供未来的设备和服务，包括三星和苹果以及电信服务提供商。最初的产品实现将结合现有的传感器、智能手机以及基于云服务的软件。例如，一家名为LifeWatch的以色列企业有一款Android智能手机产品（见图9-9），集成了血糖监测、心电图、体温、体脂肪率、血氧饱和度以及压力传感器。新型产品将会随着新型分布式传感器的出现和集成传感器功能在内的智能手机的不断发展而发展。这些产品将包括应用程序和服务，来提供一个人在生活中所需要的随时随地的、连续的、随时连线的传感服务。同时，这将带动云服务以及如安全、隐私、可配置的访问权限和集成电子健康档案这些功能的发展。



图9-9　LifeWatch健康传感智能手机（图片经LifeWatch允许使用）

开发新药物的过程是缓慢而且昂贵的。不过，由于基因和生化组成上微妙的变化，疾病是如何在分子水平上影响人类方面的研究成果越来越多。这方面的知识使我们对于为特定的基因标记和生化途径设计新型药物的需求增多。目前临床试验模式必须为降低成本、支持具有特定的遗传特征的成员组合做出改变，加快证明疗效的结果。仅在美国每年在试验上的花费约为250亿美元，在开发成本中占大约60%。通过对被测者进行生理和生化健康的大量的定量检测，传感技术在临床试验中将会发挥更大的作用。数据质量问题是目前在临床试验中的主要问题之一，我们将通过在家庭监测期间使用传感器连续监测以及自动提交数据的方式来尽量避免这一方面的问题。这些数据将以电子健康档案的形式存储在云基础设施上，使得实时的临床效果得以显示，并且潜在的副作用得以鉴别。这将使临床试验时间缩短，因为实际治疗效果的大量证据可以在试验中获得，从而加快审批程序。在心脏药物试验中，基于传感器的生理监测已经成为一个新兴的领域，在这方面24h的连续心电图监测已经实现。在临床试验期间，家用监控传感器使用的增加，应向更快、更好、更便宜的药物开发过程的方向发展。

传感技术的应用越来越吸引保险和国家服务提供者将其作为一种工具，通过主

动监测程序或监测出院后的患者从而防止严重的医疗事故。在美国，超过 30% 的医保患者在出院后 90 天内又再次入院，这有时被称为旋转门综合征。现在有一种方式针对医疗护理是如何以行动补偿绩效工资的重新评估。医疗保险现在已经修改了其补偿政策，当患有慢性病的病人在出院 30 天内再次入院的时候会对护理人员作出处罚（CMS，2013）。传感技术在评估患者的生理和运动状态，以确保他们适合出院方面将发挥更大的作用。监测出院后的病人的穿戴式和环境传感技术将成为一种普遍的临床方式。随着我们朝着更为严格以及针对患有多种疾病的病人的达标报告的频繁需求的方向发展，这种类型的监控将进一步得到发展。

传感技术，再加上其他信息通信技术，如智能手机、云计算和医疗数据分析，可以造福于社会。然而，这些技术的使用以及它们的数据可以揭示的关于个人当前或未来的健康状况将面临伦理和社会问题。这些问题必须以一种透明和平衡的方式得到解决，以确保在被监测者和数据使用者之间的信任。我们正处于一个令人兴奋的时代，传感技术与其他技术相结合，将会对个人的健康和幸福以及社会产生深远影响。

9.9 小结

在本章中我们看到传感技术在一体化医疗上所起到的关键作用，从医院环境、到社区、再到家庭监控。各种各样的因素——包括人口老龄化、向主动型医疗的发展、个性化的医疗服务，以及病人更多地参与到与健康相关的活动中——正在推动这一基于传感器的、积极型健康监测方法的发展。我们回顾了传感技术是如何在慢性病管理、研究性监测、家庭康复、移动监测以及用户使用的传感技术方面发挥的作用。传感器和信息通信技术结合成为移动形式，如智能手机，正在引领新产品和服务的发展浪潮，这场变革正在使用科技手段帮助患者实现对生活方式的选择以及满足他们不同的需求。最后，我们了解了传感技术的未来以及它将如何实现新的护理模式。

参考文献

Suzman, Richard and John Beard, "Global Health and Aging", World Health Organisation, 2011.

Fodeman, Jason and Robert A. Book. *"Bending the Curve": What Really Drives Health Care Spending*, The Wall Street Journal, New York, http://online.wsj.com/article/SB10001424052748703787304575075843971534082.html, 2010.

Vavilis, Sokratis, Milan Petković, and Nicola Zannone, "Impact of ICT on Home Healthcare," in *ICT Critical Infrastructures and Society: 10th IFIP TC 9 International Conference on Human Choice and Computers (HCC10)*, Amsterdam, The Netherlands, 2012, pp. 111–122.

Colvin, Geoff. "*We're having the wrong debate about rising health care costs*", Last Update: 2012, http://finance.fortu ne.cnn.com/2012/04/25/health-care-costs-debate/

Corocoto, Genalyn. "*Diabetes and Other Lifestyle Diseases Are Now Leading Causes of Death: Study*", Last Update: November 16th 2011, http://au.ibtimes.com/articles/250122/20111116/diabetes-lifestyle-diseases-leading-causes-death-study.htm#.UUihoxy-2So

Chase, Dave. "*Health Systems Ignore Patients at Their Own Peril*", Last Update: April 8th 2012, http://www.forbes.com/sites/davechase/2012/04/08/health-systems-ignore-patients-at-their-own-peril/

Porter, Michael E., "What Is Value in Health Care?," *New England Journal of Medicine*, vol. 363, (26), pp. 2477–2481, 2010.

Scher, David Lee. "*How Outcomes-Based Reimbursement Will Change Healthcare*", Last Update: October 25th 2011, http://davidleescher.com/2011/10/25/how-outcomes-based-reimbursement-will-change-healthcare/

Stankovic, John A., Anthony D. Wood, and Tian He, "Realistic Applications for Wireless Sensor Networks," in *Theoretical Aspects of Distributed Computing in Sensor Networks*, Nikoletseas, Sotiris and José D.P. Rolim, Eds., Berlin, Springer, 2011, pp. 835–863.

Comstock, Jonah. "*2018: 5 million disposable, mobile medical sensors*", Last Update: May 3rd 2013, http://mobihealthnews.com/22089/2018-5-million-disposable-mobile-medical-sensors/

Miguel, Kristen De San, Joanna Smith, and Gill Lewin, "Telehealth Remote Monitoring for Community-Dwelling Older Adults with Chronic Obstructive Pulmonary Disease," *Telemedicine and e-Health*, vol. 19, (9), pp. 652–657, 2013.

Cox, Narelle S., Jennifer A. Alison, Tshepo Rasekaba, and Anne E. Holland, "Telehealth in cystic fibrosis: a systematic review," *Journal of Telemedicine and Telecare*, vol. 18, (2), pp. 72–78, 2012.

Cartwright, Martin, *et al.*, "Effect of telehealth on quality of life and psychological outcomes over 12 months (Whole Systems Demonstrator telehealth questionnaire study): nested study of patient reported outcomes in a pragmatic, cluster randomised controlled trial," *BMJ*, vol. 346, 2013.

InMedica. "Telehealth to Reach 1.8 Millio Patients by 2017", http://in-medica.com/press-release/Telehealth_to_Reach_18_Million_Patients_by_2017, 2013.

Versel, Neil. "*Momentum for home monitoring of costly chronic diseases*", Last Update: 23rd August, 2012, http://mobihealthnews.com/18297/momentum-for-home-monitoring-of-costly-chronic-diseases/

NCCDPHP, "Chronic Diseases The Power To Prevent, The Call To Control ", National Centre for Chronic Disease Prevention and Health Promotion Atlanta, GA, http://www.cdc.gov/chronicdisease/resources/publications/aag/pdf/chronic.pdf, 2009.

Mearian, Lucas. "*In-home health monitoring to leap six-fold by 2017*", Last Update: 22nd January, 2013, http://www.computerworld.com/s/article/9236026/In_home_health_monitoring_to_leap_six_fold_by_2017

Pasolini, Antonio. "*Smart T-shirt to remotely monitor chronically ill patients*", Last Update: 26th June, 2012, http://www.gizmag.com/t-shirt-remote-medical-monitoring/23088/

Schwartz, Ariel. "*No More Needles: A Crazy New Patch Will Constantly Monitor Your Blood*", Last Update: 19th June, 2012, http://www.fastcoexist.com/1680025/no-more-needles-a-crazy-new-patch-will-constantly-monitor-your-blood

Gilles, Gary. "*FreeStyle Navigator CGM is Being Phased Out in US*", Last Update: 2011, http://type1diabetes.about.com/b/2011/09/07/freestyle-navigator-cgm-is-being-phased-out-in-us.htm

WebMD. "Diabetes and Continuous Glucose Monitoring", http://diabetes.webmd.com/continuous-glucose-monitoring#, 2012.

SBWire. "Continuous Glucose Monitoring (CGM) Market - Global Industry Analysis, Size and Forecast (2012–2018)", http://www.sbwire.com/press-releases/continuous-glucose-monitoring-cgm-market-global-industry-analysis-size-and-forecast-2012-2018-255983.htm, 2013.

Podimetrics. "Podimetrics - a world with diabetic foot ulcers", http://www.podimetrics.com/press.html, 2013.

Intelesens. "Miniaturised, non invasive wireless monitoring at home with zensor", http://www.intelesens.com/inhomemonitoring/zensor.html, 2013.

Rull, Gurvinder. "*Ambulatory Blood Pressure Monitoring*", Last Update: 25th August, 2010, http://www.patient.co.uk/doctor/Ambulatory-Blood-Pressure-Monitoring.htm

Uen, Sakir, Rolf Fimmers, Miriam Brieger, Georg Nickenig, and Thomas Mengden, "Reproducibility of wrist home blood pressure measurement with position sensor and automatic data storage," *BMC Cardiovascular Disorders*, vol. 9, (20), 2009.

Parati, G., *et al.*, "European Society of Hypertension Practice Guidelines for home blood pressure monitoring," *Journal of Human Hypertension*, vol. 24, pp. 779–785, 2010.

Anderson, Kenny, "*Wrist versus Upper Arm Blood Pressure Measurement*", Blog@SunTech, Last Update: April 14th 2010, http://blog.suntechmed.com/blog/29-bp-cuffs/290-wrist-versus-upper-arm-blood-pressure-measurement-wrist-versus-upper-arm-blood-pressure-measurement

Ning, Huansheng, "Unit Internet of Things," in *Unit and Ubiquitous Internet of Things*, Boca Raton, FL, CRC Press, 2013, pp. 39–40.

Stanley, Kevin G. and Nathaniel D. Osgood, "The Potential of Sensor-Based Monitoring as a Tool for Health Care, Health Promotion, and Research," *Annals of Family Medicine*, vol. 9, (4), pp. 296–298, 2011.

Lisovich, M. A., D. K. Mulligan, and S. B. Wicker, "Inferring Personal Information from Demand-Response Systems," *Security & Privacy, IEEE*, vol. 8, (1), pp. 11–20, 2010.

McKenna, Eoghan, Ian Richardson, and Murray Thomson, "Smart meter data: Balancing consumer privacy concerns with legitimate applications," *Energy Policy*, vol. 41, pp. 807–814, 2012.

Stafford, Nancy. "*Who owns the data in an Electronic Health Record?*", Last Update: June 16th 2010, http://www.ehrinstitute.org/articles.lib/items/who-owns-the-data-in

Alwan, Majd, "Passive In-Home Health and Wellness Monitoring: Overview, Value and Examples," presented at the 31st Annual International Conference of the IEEE EMBS, Minneapolis, Minnesota, USA, 2009.

Atallah, Louis, Omer Aziz, Edward Gray, Benny Lo, and Guang-Zhong Yang, "An Ear-Worn Sensor for the Detection of Gait Impairment After Abdominal Surgery," *Surgical Innovation*, vol. 20, (1), pp. 86–94, 2013.

Taylor, M., R. Goubran, and F. Knoefel, "Patient standing stability measurements using pressure sensitive floor sensors," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International*, 2012, pp. 1275–1279.

Pouliot, M., V. Joshi, J. Chauvin, R. Goubran, and F. Knoefel, "Differentiating assisted and unassisted bed exits using ultrasonic sensor," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International*, 2012, pp. 1104–1108.

Patel, Shyamal, Hyung Park, Paolo Bonato, Leighton Chan, and Mary Rodgers, "A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 9, (21), 2012.

Smith, Abbie. "*Telefónica launches tele-rehabilitation solution*", Last Update: 20 February, 2012, http://www.healthcareglobal.com/healthcare_technology/telefonica-launches-tele-rehabilitation-solution

MotionHealth. "SmartStep", http://www.motionhealth.com/webpage/1002829/1000572, 2013.

Carlo, Antonio Di, "Human and economic burden of stroke," *Age and Ageing*, vol. 38, (1), pp. 4–5, 2009.

Centers for Disease Control and Prevention. "Stroke", http://www.cdc.gov/stroke/facts.htm, 2013.

Chee Kian, Lim, I. Ming Chen, Luo Zhiqiang, and Yeo Song Huat, "A low cost wearable wireless sensing system for upper limb home rehabilitation," in *Robotics Automation and Mechatronics (RAM), 2010 IEEE Conference on*, 2010, pp. 1–8.

Bin Ambar, R., H. Bin Mhd Poad, A. M. Bin Mohd Ali, M. S. Bin Ahmad, and M. Mahadi bin Abdul Jamil, "Multi-sensor arm rehabilitation monitoring device," in *Biomedical Engineering (ICoBE), 2012 International Conference on*, 2012, pp. 424–429.

Joo, Loh Yong, *et al.*, "A feasibility study using interactive commercial off-the-shelf computer gaming in upper limb rehabilitation in patients after stroke," *Journal of Rehabilitation Medicine*, vol. 42, (5), pp. 437–441, 2010.

Fitchard, Kevin. "*Qualcomm, Verizon promote healthier living without wires*", Last Update: 5th December, 2011, http://gigaom.com/2011/12/05/qualcomm-verizon-promote-healthier-living-without-wires/

Pray, W. Steven. 2010, The Value of Nonprescription Home Test Kits. *US Pharmacist 35(4)*, 3-8. Available: http://www.uspharmacist.com/content/s/121/c/20198/

NHS Choices. "Warning about self-test health kits", http://www.nhs.uk/news/2011/03March/Pages/warning-on-self-test-health-kits.aspx, 2011.

Carrell, Rachel. "*It's Time to Allow Home Testing Kit for HIV in the UK*", Last Update: 26th November, 2012, http://www.huffingtonpost.co.uk/rachel-carrell/hiv-home-testing-in-the-uk_b_2177532.html

BIO-RAD. "An Introduction to ELISA", http://www.abdserotec.com/resources/elisa-technical-resources-and-troubleshooting/an-introduction-to-elisa.html, 2013.

Jordan, William J., "Enzyme-Linked Iummonsorbent Assay," in *Medical BioMethods Handbook*, Walker, John M. and Ralph Rapley, Eds., Totowa, New Jersey, Humana Press Inc, 2005, pp. 419–427.

Chronolab A.G. Switzerland. "Urinanalysis by mean of test strips", http://www.chronolab.com/point-of-care/index.php?option=com_content&view=article&id=472&Itemid=78, 2009.

Kelleher, Kathleen. *Medical testing in your home - Forget the office visit. Home-health exams can save time and money, and give patients some control.*, Los Angeles Times, Los Angeles, 2009.

Wanner, Mark, "*Why doesn't a healthy person's genome sequence reveal more about health and disease*", Genetic and Your Health Blog, Last Update: December 7th 2012, http://community.jax.org/genetics_health/b/weblog/archive/2012/12/07/why-doesn-t-a-healthy-person-s-genome-sequence-reveal-more-about-health-and-disease.aspx

Harvard Medical School. (2010, September). Direct-to-consumer genetic testing kits. You send in a sample and get your results online. But is it worth the price? *Harvard Women's Health Watch 18*(1), 1–3.

Xue, Yali, *et al.*, "Deleterious- and Disease-Allele Prevalence in Healthy Individuals: Insights from Current Predictions, Mutation Databases, and Population-Scale Resequencing," *American Journal of Human Genetics*, vol. 91, (6), pp. 1022–1032, 2012.

Kumar, Prashanth S., *et al.*, "Design and implementation of a bluetooth-based band-aid pulse rate sensor," 2011, pp. 79800P–79800P-7.

Whitney, Eric. "*High-Tech 'Band-Aids' Call Doctors*", Last Update: June 30th 2010, http://www.npr.org/templates/story/story.php?storyId=128877308

Montalbano, Elizabeth. "*Healthcare You Can Wear*", Last Update: January 30th 2013, http://www.designnews.com/author.asp?dfpPParams=ind_184%2Cindustry_medical%2Caid_257818&dfpLayout=blog&doc_id=257818&page_number=1

Fangmin, Sun, *et al.*, "A design of a Band-Aid like health monitoring node for body sensor network," in *Measurement, Information and Control (MIC), 2012 International Conference on*, 2012, pp. 34–39.

Hoi-Jun, Yoo, J. Yoo, and Yan Long, "Wireless fabric patch sensors for wearable healthcare," in *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2010 Annual International Conference of the IEEE*, 2010, pp. 5254–5257.

Centers for Medicare & Medicaid Services. "Readmissions Reduction Program", http://www.cms.gov/Medicare/Medicare-Fee-for-Service-Payment/AcuteInpatientPPS/Readmissions-Reduction-Program.html, 2013.

第 10 章　保健、健身及生活方式传感技术的应用

健身不仅是保持健康身体的关键之一，还是充满活力和创造性的智力活动的基础。

——John F. Kennedy，美国第 35 任总统

第 9 章讲述了传感器在健康相关领域（如慢性病管理）发挥越来越重要的作用。从医学的角度看，非健康有时可以描述为“五征兆”（“死亡、疾病、不适、残疾和不满”）中某一个或者某几个征兆的出现。因此，医学关注点就在于判断疾病是否出现以及疾病确诊后的处理（Edlin et al.，2000）。而保健则从不一样的角度看待健康。保健关注的是身体状态、生活态度和影响健康的生活方式。保健包含了健康的六个独立的指标（dimension）：情绪上的、智力上的、精神上的、职业的、社会的和生理的（Hettler，1976）。这些方面通常被共同称为健康保健的整体模型。传感器可在一定程度上用于量化健康的这些指标。在这些指标中，只有生理健康指标可以由人体自身检测到。本章重点关注生理健康，以及传感技术如何应用于检测和维持生理健康的。生理健康的促进同时也有利于保健的其他方面，例如有利于与别人的日常交往和有利于减轻心理压力。

许多因素可以影响个人的健康，例如饮食、运动、不良习惯、积极的自我保健以及适当地寻求医疗干预等（Edlin et al.，2014）。如上所述，保健是一个动态的过程，它会随着我们每天吃、喝、运动等情况的不同而改变。在现代忙碌的生活中，我们很容易就造成身心健康的失衡。而最新的科技能通过帮助个人管理生理状态来对人体产生一些积极的影响。随着传感及相关支撑技术更加无缝地融入我们的日常生活，这种趋势将在未来持续发展。我们已经可以利用独立的传感器或集成在智能手机中的传感器，通过手机软件或者网页端监控我们的活动强度、健身状态、表现水平和能量燃烧/消耗量。在更广泛的背景下，在家里和休闲区里安装的普通传感系统可以突破活动限制和行为规范为人们提供被动的对物理行为、环境交互及其他感兴趣的生理、认知和生化等参数的长期监控。系统收集的数据可以提醒我们存在的危险或异常的参数。举个例子，监测孩子或者大人的睡眠质量现在成为传感系统的典型应用。消费者不需要实时地追踪自己的睡眠，但假如睡眠呼吸暂停被检测到了，他们需要得到及时的警告。进一步地，我们通过社交媒体和朋友家人分享关于我们活动的数据和信息。这样做可以为数据添加背景，并经过积极的社会强化支持物理活动的持续进行。传感器技术将在保持身心健康方面发挥越来越重要的作用。

10.1 驱动力与阻力：运动与健身传感技术

运动和健身传感技术市场主要是由穿在身上的传感器驱动，通常集成或连接到具有全球定位系统（GPS）接收器的独立设备。运动传感技术市场预计价值到2017 年将增长至大约 9.75 亿美元（PRWEB，2013）。如苹果、阿迪达斯、耐克、摩托罗拉、锐步和 Under Armour 等公司正在进入不断增长的运动和健身可穿戴设备市场。这个市场还包括可连接到运动器材的传感器（如连接自行车的功率计用于监测骑车人的状态）和嵌入到纺织品的传感器。

10.1.1 运动与健身传感技术的驱动力

传感器在运动和健身上的应用是由多种因素驱动的，如图 10-1 所示。例如，人们越来越意识到身体活动在维持他们的健康中所起的作用。现在各种各样的社会和技术因素影响并支持人们参与运动和健身活动。下面将更详细地阐述一些关键因素。

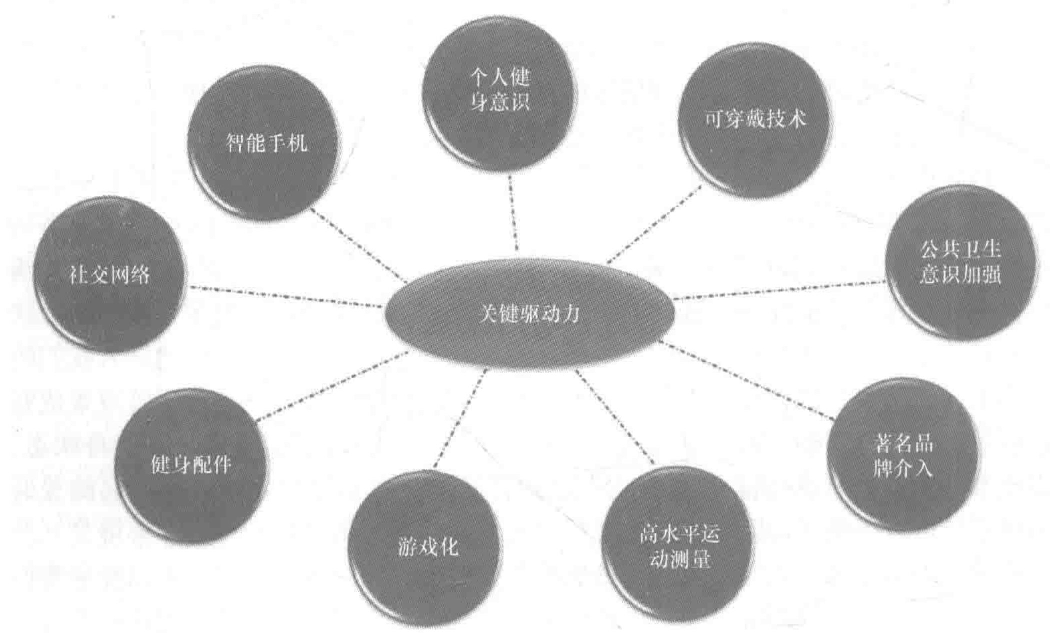


图 10-1 健身传感技术应用的驱动力

- 健身意识：公众健身的兴致和参与感持续增强。越来越多实用性杂志关注一般健身和特定的运动，如骑自行车、跑步、骑山地自行车和三项全能运动，有助于提高公众的认识和兴趣。这些出版物以及各种网站，告诉人们什么类型的技术信息是可用的以及如何使用和解释健康统计数据。

• 公共卫生意识加强：公共卫生宣传运动使人们更加意识到体育活动对身体的积极影响。越来越多的公众意识到不运动和健康问题的联系，如肥胖以及肥胖相关的疾病，包括糖尿病和癌症。活动监测器提供一种简单的方法来跟踪活动的水平。这些设备的数据通常在社交网络与同辈群体共享以获得支持和维持的动力。

• 智能手机：智能手机的普及，特别在健身人群中的普及，提供了本质上零成本的传感和软件平台用于基本健康监测。这个单一的要素就提供了通过 GPS 的定位系统、利用内置加速度计和陀螺仪的惯性传感、地图软件、数据分析应用、大触摸屏显示、音乐播放器、无线（蓝牙、Wi－Fi、ANT 和 NFC）和移动电话网络连接等功能。从应用程序开发人员的角度来看，智能手机提供了一个适合于创新软件的开发平台和重要的市场，让应用程序得以快速开发并与消费者分享。因此，消费者可以免费或者一次性付费获得各种可选的应用程序。正如之前章节中所讨论的，应用程序开发人员不需要成为传感器专家，因为智能手机的开发环境抽象底层传感器的功能细节。对非传感器专家来说，这是一个优点，但是这种抽象会影响传感器测量的准确性。出于这个原因，智能手机也可以无线连接到专用外部健身传感器来获得更准确的传感数据。

• 无线健身配件的使用：无线健身配件，如心率监测仪、计步器、节律传感器和功率计等，允许消费者在现有的智能手机或户外 GPS 手持机上添加健身功能。这些配件通过包括 ANT、蓝牙、Wi－Fi 和 NFC 等标准接口连接，并为智能手机开发人员提供捕捉数据的 API。这消除了购买昂贵的专用健身数据记录器，如健身手表的需求。健身配件的可用性和普及性将随着互用性标准，特别是智能蓝牙（Bluetooth Smart，一种蓝牙低功耗协议），被智能手机和配件制造商采用而持续提高。

• 可穿戴技术和智能纺织品：可穿戴技术越来越被公众熟识，其代表公司就是 Fitbit 公司。之前，一旦穿着明显的传感设备，如霍尔特氏心电动态监测仪（Holter monitor）或者个人报警器，这些设备就会被视为“依赖的象征”或者疾病的象征。但是，现在可穿戴传感器已经变成了时尚物品，成为“荣耀的象征”，这代表着用户主动地在坚持保健。可穿戴设备的大小也越来越小，也暗示着可能小到能集成到我们正常的衣服中，如运动文胸、运动背心。如 Nike + Fuelband 等智能手环设备，这些设备的成本不断下降，价格对普通健身、保健爱好者来说越来越可接受。

• 高水平运动：专业运动团队和运动员不断寻求方法，以获得相对于对手的竞争优势。在运动领域，数据分析团队和运动科学家团队变得跟教练一样重要。运动科学家洞察运动员的健康和状态，不断监测运动员的状态参数来优化训练、营养等各种方面的配置。运动“统计数据”例如队伍组成、最近结果、实时状态等现在已经成为观看电视体育体验中不可分割的一部分。专业运动团队通过分析包括自

身表现、对手表现甚至于裁判表现的各方面来分析弱点，从而可以利用自己的优势、强项去应付对手。例如，在新西兰的一项研究中使用了 GPS 与心率测量技术相结合的方法来评估足球裁判的决策的准确度（Mascarenhas et al.，2009）。

- 著名品牌介入：因为某些知名品牌如耐克和阿迪达斯都进入健身传感市场，健身传感技术正变得越来越普遍。这些制造商与现有健身传感制造商（如 Polar 和 Garmin）有合作关系。这些合作关系提高了现有技术的知名度，并赋予这个小众市场一个理想生活方式的市场定位。备受瞩目的科技品牌，包括苹果、摩托罗拉和移动运营商，也积极地寻找市场机会。这些知名企业的活跃清晰地表明它们对技术驱动的健身传感市场巨大潜力的重视程度。

- 社交网络：健身应用程序的另一个重要驱动力是社交网络的集成。用户可以上传自己在集成的或外部传感器中的数据到网络/云系统中，并能在线和他们的家人、朋友、同辈群体分享他们的健康统计数据。同时，也可以在网络接入设备中实时追踪每个人的活动。在线追踪和分享健身数据的功能可以在同辈群体中强化用户保持健身并设定新目标的动力。例如杂志、在线健身社区为人们讨论提供一个有效的渠道，并能让人们了解个人健康传感器技术和相关应用程序。例如，RunKeeper 程序允许跑步者在智能手机里追踪他们的跑动距离、速度和节奏。此外，在把好友加入到 Street Team 列表后，跑步者可以利用社交网络在 Facebook、Twitter、谷歌和其他网站上与朋友保持联系。Street Team 特性允许用户分享他们的训练细节，包括训练地图、地形细节和各种统计数据，如距离、速度等（www.RunKeeper.com）。

- 健身数据游戏化：基于社交网络的健身数据的共享和游戏功能成为健身传感技术被人们接受的驱动力。游戏功能还允许志同道合的用户进行交互、比较和竞争。这些技术将可以鼓励用户使用并产生用户“黏性”。例如，耐克在 iPhone 手机中的轨迹跟踪应用有一项“标签”功能，能让用户为彼此贴标签，形成了一个朋友间的贴标签游戏。开始游戏的那位决定这个游戏基于跑步距离、跑步时间还是谁是最后的那个。这种方式的另一个例子是基础 B1 健身追踪器，它能监测心率、出汗量、步伐和表皮温度。B1 的数据被传输到一个 web 应用程序，程序提供了对用户日常生活的分析，并鼓励用户去适应目前习惯或者通过游戏化的方式开发新的健康的生活方式。

10.1.2 运动与健身传感技术的障碍

尽管健身传感应用程序中有新技术的采用和突破，但许多阻力仍然存在。这些包括在智能手机生产因素、健身应用程序、专有的无线传输协议和成本方面的限制。以下详细叙述一些关键限制因素。

- 应用选择：苹果应用商店和谷歌应用商店包含数以千计的健身监测和教育应用。最常见的应用类别是身体质量指数（BMI）和卡路里计算器、饮食指导、运动指导和运动跟踪应用。像健康应用，这类应用的数量和多样性意味着选择一个相

关的并且高质量的应用是一个令人沮丧的挑战，除非你是给特定的传感器制造商寻找应用。第 6 章讨论中，健身应用所提供的信息的质量和准确性通常是不规范的并且可能携带误导性信息。所以在应用提供建议后有必要小心谨慎，如果你怀疑从应用获得的数据信息是不准确的或令人担忧的，可以去参考“金标准”，比如保健/健身方面专业的传感器设备。

- 智能手机设计：虽然一般的情况下休闲健身的用户只是想跟踪时间和距离，但是作为健身传感装置，智能手机可能不适合剧烈的户外运动及健身。对剧烈的健身运动而言，大多数智能手机缺乏必要的强化，如钢化玻璃罩、防水和冲击保护等。智能手机的生产因素对健身应用的运行影响相对较大，且实际上可以影响应用的性能。GPS 是仍然在移动设备上一个相对较新的和不断变化的传感器。但 GPS 的性能对健身应用来说并不足够，特别是与专用的设备对比。虽然电池技术在不断提高，但智能手机的使用时间可能不足以用于高功耗的传感器（如 GPS）的连续使用和长时间的耐力项目（如登山）的分析记录。

- 专用的无线连接协议：直到最近，各大设备供应商的独立健身传感设备都是基于专有的 ANT 个人无线协议传输数据的。该协议在同一设备供应商的利用率是很高的，因为它鼓励人们使用同一个供应商的产品，以便利用他们以前在传感装置和集成器件上的投资。然而，除了几个小众产品外，几乎没有采用这个协议的手机。无线设备通信的标准化目前正在起步，采用了蓝牙智能标准。蓝牙智能设备将在几年内达到一定数量。

- 设备成本：专用传感器，尤其是那些集成 GPS 跟踪模块的，成本相对较高。而高昂的成本把它们局限于专业人士或健身达人市场。然而，刚进入市场的企业和传感器使用者都希望将设备成本进一步降低。

10.2　运动与健身传感技术的应用

据《ON World》估计，到 2017 年，每年的移动健康和健身传感设备市场将达到 5 亿个（PRWEB，2013）。大型零售商百思买和塔吉特（Target）等为这种类型的设备提供更多的货架空间来满足增长的需求。传感器可以以各种形式因素支持不同的使用模式：

- 传感器集成于运动设备中：一般健身传感器集成到健身器材用于监测物理参数，如力量、力矩、步伐等，或生理参数，如心率、呼吸率等。

- 传感器连接到运动设备：这种传感方式越来越受欢迎，特别是在传感器单元的尺寸减小后。来自这些传感器的数据通常用于分析人体的力学特性，并能深入了解特殊的传感方式对人体特性积极或消极的影响。

- 个人可穿戴传感器：这可能是监测健身和保健最常用的方式。在训练和日常生活中，可穿戴健身设备通常通过从戴在身体的小型轻量传感器捕获生理和运动

数据集。

可穿戴式健身传感器最初是独立传感器，如简单的计步器。但是，这些设备现在正在被“智能设备”取代，“智能设备”能提供本地计算能力，并能远程连接到另一台设备。这些装置包括智能手机和运动手表（例如，Polar 运动手表具有集成 GPS 跟踪和心率监测的功能，来自 www. polar. com）。来自这些传感器设备的数据可以与其他信息组合以创建个人训练的整体效果和长期趋势图。该数据也可被掺入到一个基于网络的门户进行进一步的处理，可以在家庭和朋友之间共享，或在同辈中比较。

在可穿戴式健身传感器市场运作的公司，包括专注于健身和健康设备的公司（如 Polar 和 Fitbit）、大型运动服装公司（如耐克和阿迪达斯）和新加入的公司（如开发健身和健康外设的 Jawbone）。可穿戴式传感器可以有各种形式的产品，包括臂章、袖带、服装的别针，或者传感器直接集成到鞋类和服装中。

10.2.1 支持无线技术

“智能”健身传感器的一个关键功能是它们与外部设备（如智能手机）的通信能力。虽然一些设备提供有线 USB 连接，但大多数支持无线连接。传感器和类似智能手机的主设备之间无线连接的一个关键要求是避免对人体活动的限制。供应商运用了许多专有协议，包括 Polar 公司的 W. I. N. D. 专用无线协议、Garmin 公司从 Dynastream 公司获得的 ANT 协议、TI 公司的 Simpliciti、FitLinxx 公司的 BodyLAN 协议和 BM 创新公司的 BlueRobin 协议等。

在这些专用协议中，ANT 协议在健身传感市场中最具有渗透性。正如在第 3 章的概述，ANT 是一种低成本、低数据率、超低能耗的协议，可以在同一个电池下工作数月甚至数年。它主要用于心率检测仪、速度/步频传感器和功率计，以连接到如运动手表等装置。它也可以用在健身器材中。为了提高使用 ANT 协议的设备之间的互通性，ANT + 标准已创建。ANT + 定义了网络参数以及用于基于 ANT 通信的数据内容。这使得基于 ANT 协议的不同设备得以进行数据通信和数据交换。据估计，市面上有超过 6000 万使用 ANT + 协议的运动、健身和健康设备（www. thisisant. com）。

由于其相对较高的电力需求，蓝牙（BT）在健身传感器领域有较大局限性。然而，低成本、低功耗、低数据速率扩展版蓝牙协议——低能耗蓝牙（BLE）或智能蓝牙（Bluetooth Smart）预计能被市场广泛采用，因为它的能耗性能堪比 ANT。智能蓝牙的功耗是普通蓝牙的 1/10——标准纽扣电池的电量可维持设备一年多的使用。关于 ANT 和 BLE 的比较见表 10-1。IMS Research 估计，到 2016 年，智能蓝牙在运动和健身设备的普及率将超过 ANT，45% 的设备将具有智能蓝牙功能（IMS Research，2012）。

表 10-1　智能蓝牙协议与 ANT 协议技术参数比较

技术参数	智能蓝牙协议	ANT 协议
频率范围	2.4 ~ 2.483GHz	2.4 ~ 2.483GHz
网络标准	IEEE 802.15.1	专用
软件栈	128 ~ 256KB	16KB
安全	128bit AES	128bit AES
数据速率	1Mbit/s	1Mbit/s
功耗	收发：15mA	收：17mA，发：15mA
传输距离（自由场）	100m（户外）	100m（户外）
拓扑结构	简单星形拓扑结构	复杂拓扑结构
网络类型	无线个人局域网络	无线个人局域网络

10.2.2　健身传感技术

无线传感器允许智能电话或定制聚合器来控制传感器捕捉，并把数据处理转化成感兴趣的参数，如速度、骑自行车踏频和心脏速率。在大多数健身应用中，传感器不能被集成到主设备，因为它们必须接近信号源，如心脏、循环轮或脚。在传感器被集成到所述主设备的情况下，所得到的数据质量取决于主设备相对于待感测的参数位置。捕获任何运动相关的参数尤其如此。例如，集成加速度计提供的数据质量往往较差，因为该装置的支撑臂会进行反向运动。在可预见的将来，独立的运动传感器将会继续存在，提供质量优良的传感器数据。

传感器和主设备间的无线连接允许健身爱好者实时跟踪自己的表现。假如主设备打开网络连接且数据所有者愿意共享，朋友、同事和教练还可以在线跟踪传感器实时数据。从形状的角度来看，某些特定的活动对主设备的屏幕尺寸有一定要求。“黑箱”传感器，如自行车电表和心率监视器，没有屏幕，因此依赖于主设备实现实时可视化数据。大屏幕对有些活动是有利的，如骑自行车。虽然小屏幕可以实现长时间活动减少任何对使用者的影响，但对于许多用户来说，相比实时信息显示，查询数据的功能更重要。离线数据可以用多种方式查看，例如直接在主设备上可视化基本的概要信息或者上传到平板电脑、PC 或互联网中进行复杂的分析和可视化。值得注意的是，对想要提升和分析自己表现的用户来说，支持软件的质量越来越重要，甚至与机器本身一样重要。与朋友分享健康数据和统计信息以及把竞争元素添加到健身活动中可以增强与日益火爆的社交网络的关联性。与朋友、同辈比较或交换数据可以让健身变得更愉快，帮助健身维持更长的时间。在人们移动到新的地方后，共享数据还有一定程度的灵活性，允许用户在所在区域与志同道合的人相识。聚合应用程序的核心作用是吸引新用户，为他们提供一个实时的维度，因为这一代技术的成熟的重要特点就是实时地满足用户服务。此外，纵向的数据共享功能为沉

迷网络的人们提供了激励和社交元素。许多健身传感的解决方案都包含多媒体接口功能，允许用户在健身活动中听他们喜欢的音乐或拍照片与他人分享。

大量可穿戴设备以各种形式出现，为用户提供实时的生理或生物力学状态监测。定位消费级的健身配件，一般利用智能手机以降低系统的总成本，充分利用到智能手机连通性、处理能力和显示能力。最常见的形式如下：

- 胸肩带：这种设备是放在靠近胸腔的地方测量心脏参数的，包括心率和R－R间隔。许多胸肩带也配有惯性传感器用于计算速度、距离和身体的位置。胸肩带与智能手机应用或可穿戴式显示设备（如智能手表）连接后能提供实时数据和汇总信息。健身爱好者可以在训练时实时监控他们的速度和心脏状态，从而相应地调整他们的训练强度。训练后，胸肩带也可以用来查看汇总数据，分析训练强度、热量消耗和恢复时间等。在专业团队运动中，运动科学家把胸肩带分配给每个球员后就可以在训练中实时监控个人的心脏参数。而且，在训练后，运动科学家可以分析训练数据判断成员是否过度训练并调整他们的训练，以防止受伤。在消费级，像 Zephyr 等公司会提供他们健身应用的 SDK（软件开发工具包），以便于他们的产品可以兼容第三方应用。举个例子，Zephyr BioHarness 胸肩带（Zephyr，2013）可以与大量的免费第三方应用进行交互，包括 Endomondo（www. endomondo. com）和 Fit4Life（www. fit4life. com）。

- 腕带：腕带的外形是便携的和快速获取的。简单的带定时器的数字手表是第一个主流消费级健身配件之一。对于传感器、处理器和电池技术的进步已经允许设备制造商能够制造出嵌入更多功能的腕带。结果出现了两个新的设备类型——最近几年出现的运动手表和智能手表。运动手表，比如 Polar RC3 GPS，集成内置传感器并且还可以具有与外部的设备（如胸肩带）进行通信的能力。所有运算处理都在运动手表上进行，并在运动手表的显示屏上显示结果。从运动手表获得的数据通常可以连接到一个平板电脑、PC 或智能手机进行长期数据存储和分析。智能手表，如 Pebble（getpebble. com），让健身爱好者在锻炼时能够利用智能手机的处理能力而不需要把手机戴身上或者随时看着。智能手机从多个集成和身体佩带的传感器得到数据并进行处理、存储。智能手表只显示有关的概要数据，运动员能够快速且容易地获得。

- 脚垫与鞋垫：装载着加速度计和陀螺仪的脚垫（如 footpod）装在鞋子上可以直接测量到步伐、速度和偏离脚的距离。这些微小的轻量的设备与运动手表或者智能手机配对，并利用手表或手机处理获得的数据。Nike + iPod 传感器是最受欢迎的脚垫之一。这种传感器被放入 Nike + 跑步鞋或者利用固定器固定在不兼容的跑步鞋的鞋带上。传感器获得的数据会传送到 iPhone 手机或者 Nike + 运动手表中。压敏鞋垫最初被足科医生用于临床环境下动态监测脚和鞋子之间交互。这些数据可以用于诊断双脚的不对称以及为健康和正常运动的目的制定矫正方案。在临床外，脚垫在监测运动表现中越来越常用。Nike + 篮球鞋在鞋底嵌入了压力传感器，这些

数据会结合加速度计所得的位移相关的参数（如纵跳高度）进行运动分析（Nike，2012）。

• 传感器贴片：小型传感器可以黏附在身上（像创可贴一样）并通过无线把数据传输给智能手机应用。例如，Somaxis MyoLink 是一个测量肌肉能量输出的传感器贴片，可以检测当人开始跑步时，腿肌肉是如何活跃起来的，并可以提供关于运动强度、疲劳程度、耐力和恢复程度等的数据。而把 MyoFit 传感器放在双腿上可以测量肌肉对称性。非对称的鉴定可以预防潜在的伤害（Davies，2012）。在职业运动领域，一家叫 TMG - BMC 的斯洛文尼亚公司利用肌肉状态分析法（tensiomyography TMG）来诊断运动损伤相关的肌肉不平衡。相关的传感器可以测量利用电刺激器人工诱导的肌肉收缩。当肌肉扩张时，皮肤表面的位移传感器测量肌肉的扩张比例。结果会以时间 - 位移图曲线显示。这项技术已经被奥林匹克短跑运动员和巴塞罗那足球队使用（TMG - BMC，2013）。心电图传感器贴片可以进行长时间的心率测量，这种方式越来越受欢迎，或许将很快在健身领域取代胸肩带设备。像 Somaxis MyoBeat 和 Zepher BioPatch，胸肩带设备和心电图传感器贴片经常会与智能手机配对实现心率监测。

• 便携式设备：庞大的实验室设备的微型化、民用化是一个新兴的趋势。美国亚利桑那州的 Breezing 公司开发了一个新型的便携式代谢跟踪器（见图 10-2）。通过先进的间接热量测定技术，传感器能精确地估计能量消耗。这种技术常用于运动诊所，用于测量在休息或者持续运动状态下二氧化碳产生量和氧气消耗量。传统的方法是利用代谢车和庞大昂贵的仪器，这样也限制了其移动性和实用性。而 Breezing 公司的小型仪器则可以被运动员在运动中方便携带（Coxworth，2013）。除了代谢，这种传感器也能检测呼吸比（Respiratory Quotient，RQ），即二氧化碳产生量与氧气摄入量之比。同时，它也能识别出人体正在消耗的“能量源”种类——碳水化合物、脂肪还是两者混合物。传感器的数据可以通过蓝牙传给 Android 或者 iOS 设备，然后用户就可以查看跟踪

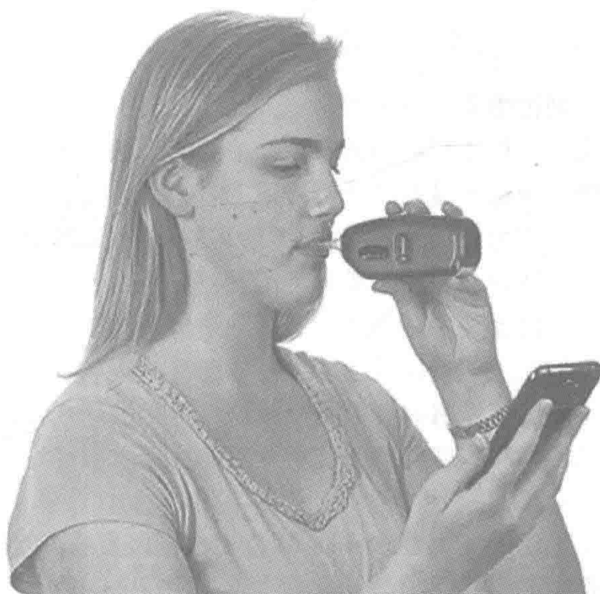


图 10-2　Breezing 是一个代谢跟踪器，由电池供电，与智能手机同步。产品包括一个用户交互应用（图片已获得 Breezing 公司授权）

自己的代谢历史、呼吸比和体重（通过无线或者手动输入）。它还有一个智能算法支持用户建立健身或者瘦身计划。Microlife 公司也有一个类似的叫“BodyGEM RMR”的间接热量测量设备。它的功能被该公司称为“代谢指纹”（Metabolic Fingerprint）（BodyGem，2013）。这个设备检测静息代谢率，可以在减重健身计划中使用。

传感器在运动与健身领域的应用持续发展。虽然对业余爱好者来说，目前市面上许多产品都有可接受的性能和外形，但是可能对专业运动员和运动科学家而言是不够好的。在专业运动领域，专业的传感器需要有获得极精确的特定生理和代谢参数的性能，这些是消费级传感设备所达不到的。但是随着低成本可穿戴式传感器性能的发展，对专用的昂贵的解决方案的需求会慢慢降低。对运动表现的检测经常导致所谓的“观察者效应”——运动员知道传感器的存在，影响了自身表现。对这些用户而言，发展的目标就是让传感器难以察觉。理想情况下，这些传感器不会导致认知惯性，安装在身上也不应该产生任何明显不适（Harle et al.，2012）。随着制造工艺的发展，传感器体积的减小会解决部分问题。另一种解决方案就是把传感器集成到运动服上，这些将在下一节进行讨论。

10.2.3 服装传感技术

把传感器集成到服装里，其驱动力是电子学和新式纤维、纺织品之间越来越多的交叉。在进行运动或者活动检测时，服装为人体检测提供了天然的平台。最近，感知和响应环境刺激或监测佩戴者生理状态的智能材料已经问世了。这种传感技术经常被称为智能服装或者智能服装系统（Kaur，2012）。这些系统可以观测到重要征兆、移动、生物电势和周围环境（Jeong et al.，2013）。在衣服中加入传感器有很多优势，其中之一就是可以隐藏传感器。利用精心打造的衣服作为载体，把传感器放置在身体表面可以解决与传感器放置和位置相关的很多棘手的问题。一个合适的智能服装传感器可以通过减少测量时的干扰动作大大简化测量数据的分析过程。传感器间和支持电路的线材可以集成在衣服纤维中，这可能会提高无线传感器间通信的可靠性。

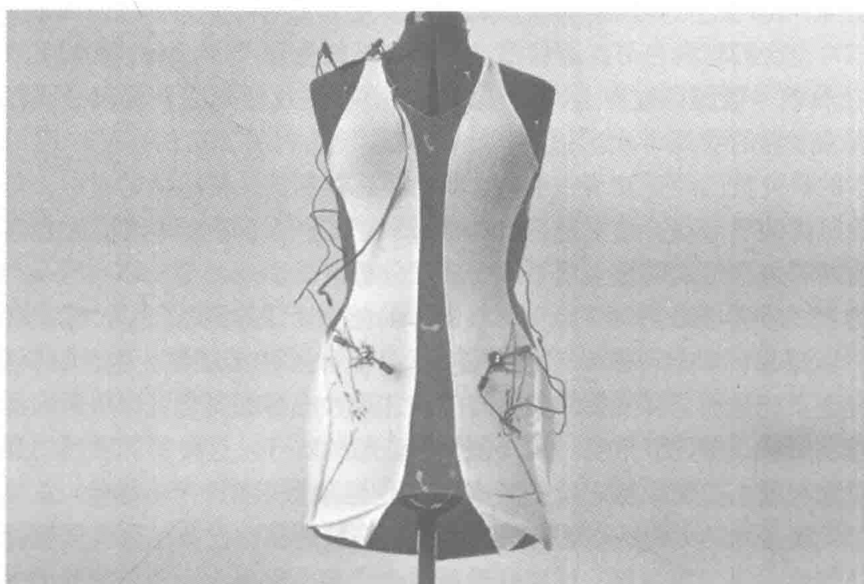
阿迪达斯和 Textronics 等公司都已经发布并且上市了有心脏检测功能的 T 恤衫、背心甚至是女性的运动文胸等各式产品（Textronics，2013；Eric，2012）。新生的产品和样机都具有与智能手机点对点通信的功能。智能蓝牙协议的诞生也促进了与运动相关应用匹配的智能服装的流行。有好几类的智能服装应用，详细如下：

- 物理冲击检测：接触性运动中，物理冲击尤其是头部撞击多年来都备受关注。运动服制造商锐步（Reebok）公司和设备制造商 mc10 公司为美式足球运动员开发了一台头部撞击指示器 CheckLight。这个产品的作用是在运动员收到猛烈头部冲击后会看到明显的指示。这个传感器放在一个帽子里。条状的传感器可以提供定向的、转向的加速度和定点的、持续的冲击信息。获取的信息由微控制器运用专利

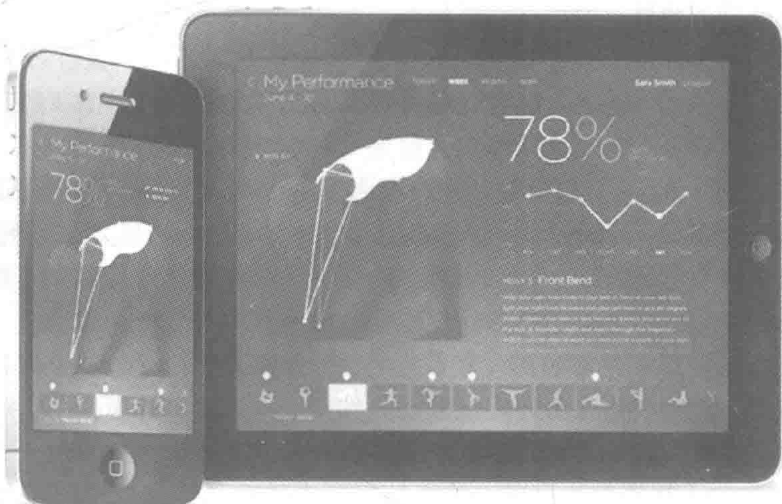
的算法计算冲击的严重程度。算法的输出会点亮传感器模块中两个 LED 灯中的一个。轻微冲击会闪烁黄色灯，而猛烈冲击会闪烁红色灯（Gorman，2013）。

- 生物信号监测：世界上，超过一半的心率测量带是由 Finnish 公司生产的。这些带有发射器的纺织带在阿迪达斯、Garmin 和飞利浦公司的产品中应用。美国东北大学的研究员已经开发了一个包含肌电传感器和其他传感器的衬衫，可以在锻炼中监测肌肉的电活动。数据传递给 Android 智能手机可以实时地报告心率和倒计时。数据同时也上传到网络上用于历史数据分析（Belezina，2012）。
- 生物力学监测：丹麦 Danfoss PolyPower 公司已经开发了基于绝缘体电活性聚合物（Dielectric Electroactive Polymer，DEAP）技术的传感器。这种材料展开后，其厚度将改变，导致了可测量的电容的变化。这种电容的变化可以用来检测身体中的生物力学信息，如关节角度、动作幅度和肩膀的对齐。这种薄低矮型的弹性材料可以集成到衣服、护腕护膝、防护装备和其他运动服装中。PolyPower 公司展示过一个基于智能蓝牙的无线版本的传感器，可以连接到移动设备。这个样机同时也集成了传统的传感器（陀螺仪、加速度计和磁力计）。PolyPower 公司展示了一件采用这个传感器的高尔夫训练套筒样机。在这个样机中，该无线传感器系统用于测量肘部的角度和挥动的幅度。肘部运动时传感器伸张，就可以测量关节的角度，数据会和其他传感器（加速度计、力量传感器等）获得的数据匹配。整合好的数据表格会通过无线上传到 iOS 设备，经过处理后会给练习者反馈，告诉他如何提高挥杆技术（Weiss，2013）。
- 生理反馈：Move 项目专注于生产嵌入传感器的衣服，帮助人们提高普拉提技术。Move 项目是一件在前后和两边嵌入四个拉伸和弯曲传感器（当传感器向任意方向弯曲，传感器阻抗减小）的衣服，如图 10-3a 所示。带云服务的移动应用如图 10-3b 所示。传感器会跟踪特殊位置的背部肌肉和腹部肌肉。移动应用则评估姿势是否正确。在臀部和肩部的触觉模块会给予实时的触觉反馈来矫正不正确的动作。云服务可以让用户追踪历史表现以及提供一个用来存储的库，用于定义新的动作或存取预设动作（Krakauer，2012）。
- 环境监测：智能服装也吸引着户外运动市场和其他休闲活动市场。传感器和执行器被用来改变对环境条件或其他外部激励的响应（Bye，2010）。在这个新的领域出现的许多传感技术都有军用需求。举个例子，Brenig 公司在北极探险队的服装中嵌入可穿戴技术，开发了一个袖套式的指南针。

传感器、服装与可穿戴计算和移动设备的共生会促使它们继续在性能、稳定性和用途上的发展。从传感的角度看，其应用方向将仍然是直接/接近和非直接皮肤接触的混合方向。传感器将会利用像压阻纱线、容性材料和光学纤维等传感方式附在或者直接集成在纺织品上。而潮流也将有重要影响。人们对潮流和技术结合的时尚可穿戴设备越来越感兴趣。这将是未来几年快速发展的和令人兴奋的创新领域（Higginbotham，2013，Darmour，2013）。



a)



b)

图 10-3

a）时装摄影师 Leo Lam 拍摄的 Move 传感衣服的样机（图片已获 electricfoxy. com 允许）

b）Move 软件用户界面（图片已获 electricfoxy. com 允许）

10.2.4 运动装备传感技术

传感器技术和信息通信技术（ICT）在运动装备上的结合为判断运动员表现和运动员与运动装备的交互提供了新的见解。传感器可以附在或者集成在运动装备

中，或者当运动员利用运动装备时穿在身上。运用现代无线传感技术的关键优势之一是它将运动员从实验室的限制中解放出来，允许数据在更接近竞技环境的情况下获取到。设备专用传感技术和标准生理、运动传感技术的结合可以通过一个丰富的多传感器数据集。这个数据集可以揭露参数间的特殊关系、为表现提升提供更有用的提示和进一步改进的方向。

1. 自行车运动

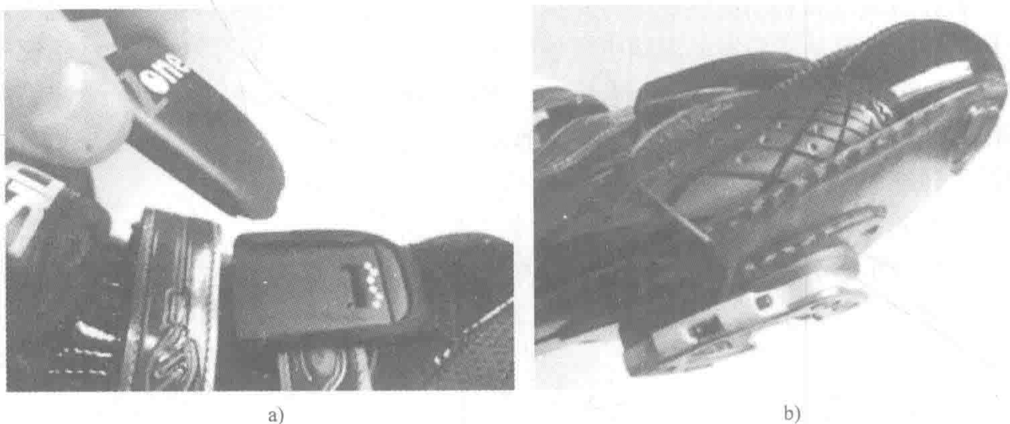
对自行车运动的传感需求与通用健身传感相似：跟踪速度/距离、海拔、能量消耗（卡路里）和心率。像自行车这样的运动，使用某些形式的装备就有机会获取额外的设备专有参数。在自行车运动中，节律和能量这两个参数非常重要。节律传感器通常利用磁力技术。磁铁安装在后轮辐条上，而接收器安装在车架上。接收器检测磁铁的每一次循环并把数据传输到安装在车把上的显示屏中。显示屏提醒自行车运动员把节律保持在 95 次/min（Maker，2011）。

主流运动自行车市场一个新的发展是能量仪的上市（Cycling Weekly，2013）。安装在车把上的数字显示单元可以实时地提供许多能量指标，如瞬时能量、最大能量和平均能量。这些显示器可以连接其他无线传感器，如心率监测仪，实现多传感器参数显示。能量仪对客观地测量运动员的真实输出很有用，相对于单纯的生理测量（如心率测量），能量仪被视为更好的训练提升辅助仪器。许多生产商都可以提供能量仪，包括 Polar、Garmin、Quarq、SRM 和 Power2Max。这些传感器可以安装或者集成在车柄和辐条上。能量仪正常情况下会基于应变仪和加速度计的结合。应变仪测量所受的转矩而加速度计测量速度。数据会结合起来计算能量。能量传感器市场上报价是 2000 ~ 3000 美元。便宜一点的替代选择包括安装在车柄上的外置磁力传感器（用于检测链条张力和速度）或者利用车把安装传感器检测风速。每种方法都有其局限性，其精确性低于应变仪。

爱尔兰 Brim Brothers 公司开发了一个创新的测量能量的方法。如图 10-4a 所示，其样机是一个 18g 的数据收集舱，贴在鞋背上。舱内包含运动传感器，用于测量踏板和曲柄的旋转位置和速度，从而计算出节律。所以，节律的测量不需要磁铁。运动传感器也可能持续地提供骑行者在路上的详细骑车风格和效能等信息，但这个功能目前只能在研究实验室中静止的自行车上实现。能量检测由专利的压电陶瓷传感器完成。与应变仪相比，这种传感器更加耐用，对温度依赖更少。传感器测量力学信息不需要弯曲机械部分，因此整个力学测量系统可以变得很小。如图 10-4b 所示，力学传感器嵌入在踏板上，而不是贴在上面。这表示踏板的大小和厚度无增加，整个系统独立于自行车（Brim - Brothers，2013）。

2. 高尔夫球运动

由于高尔夫球的运动性质，高尔夫球运动具有很长的使用各种辅助和机械设备提高挥杆或推杆准确度的历史。高尔夫球选手通常被认为具有很高的购买力去投资



a)　　b)

图 10-4

a）数据收集舱　b）嵌入在踏板上的应变计传感器（图片已获 Brim Brothers 公司允许）

这些辅助设备。专业高尔夫球教练利用红外光学检测、视频分析、声学分析和多普勒雷达作为辅助装备提升运动员的高尔夫球技术。最近，惯性传感器已经被应用在高尔夫球运动中。传感器被贴在球杆、手或手臂上。某些具体的实例如下：

- Golfsense 产品把四个基于 MEMS 构建的惯性传感器集成到一个小单元中。如图 10-5 所示，这个单元重 17g，被贴在高尔夫球手套的背部。传感器采集到的数据经由蓝牙传输到 iOS 或者 Android 移动设备中进行分析和显示。杆头速度、杆头位置、挥杆速度和挥杆路线等参数会被计算并显示出来（GolfSense，2013）。这个方法的一个关键优势是其适应性。它可以在任何地方不需要帮助就能使用。而备用的检测挥杆的方法是把传感器直接贴附在球杆的轴部，这类产品有 SwingSmart（www.swingsmart.com）、SwingTIP（www.swingtip.com）和 Swingbyte（www.swingbyte.com）。这些产品也通过无线通信与移动设备连接。

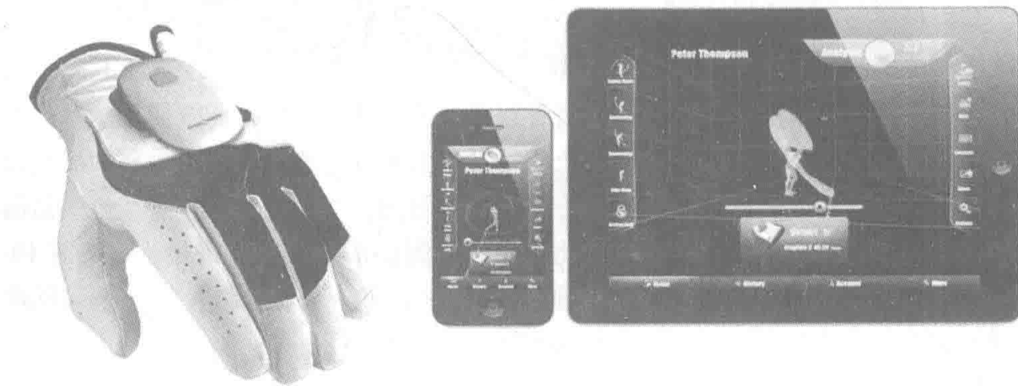


图 10-5　Golfsense 惯性传感器用于高尔夫球挥杆的分析（图片使用已获 Golfsense 公司允许）

- 虽然大部分传感器相关的产品是用于高尔夫球挥杆分析的，3Bays 公司开发了一个创新的叫作 3BaysGSA Putt 的、重量小于 10g、基于九轴惯性传感的传感器产品。这个设备贴在推杆的末端，通过蓝牙给 iOS 移动设备推送数据。3BaysGSA Putt 应用提供了很多测量参数，包括击球的杆面角、后摆时间和下摆时间等（3BaysGSA，2013）。

2006 年 1 月，经竞争委员会赞成，美国高尔夫球协会（USGA）和圣安德鲁斯皇家高尔夫球俱乐部（R&A）制裁了在比赛中使用测距设备（GPS 和激光）的行为。激光测距仪可以在高尔夫球场中测量出到任何能反射光的物体的距离，包括树、丘陵和沙坑等，也可以用于测量到穿着绿色衣服的运动员的距离。GPS 单元用于显示球场中到预选点的距离。许多设备可以提供一个彩色的球洞的鸟瞰图，从而决定最合适的进球路线。像 Garmin Approach 1 等其他产品，利用一个手表外形的产品通过绿地的信息提供简单的距离信息。一些更先进的设备提供了虚拟的整个球洞的立体模型。GPS 系统通常小于激光产品，因为激光产品需要复杂的光学结构测距。

3. 其他运动检测

传感器正在被很多主流的小众的运动市场所接受，特别是那些有合适的技术元素或者使用运动装备的运动。多普勒雷达传感器，例如 Sports Sensors 公司的产品，在剑术、棒球和网球等运动中使用（Sports Sensors，2013）。这些传感器提供了实时的速度反馈，这些反馈可以用于提高性能。传感器可以直接贴附在运动装备上，如剑术和棒球，或者在网球、高尔夫球运动中在非接触模式下工作。采集的数据可以用于提高速度、准确度和稳定性。在爬山、高崖跳伞、悬挂式滑翔和徒步等活动中，气压传感器可用于海拔的测量。这些传感器一般与 GPS 单元合用，或者在跳伞运动中整合入磁变仪（用于测量下降或上升速度）。对于登山运动，传感器可以整合入手表中，例如 Casio PROTREK 手表。除了海拔信息，气压的改变可以用于估计即将到来的天气条件的变化。但是，这些传感器的准确性都不一致，因为气压和温度的漂移会在高度计的测量中导致很大误差。

游泳运动中，澳大利亚体育学院在精英训练计划中使用了传感器，用于跟踪圈数、时间花费、划动速度和每一圈的游泳类型。这样使得教练能随时随地利用可登入的网页数据输入代替手写训练日记（Chaganti et al.，2011）。AvidaMetric 公司开发了由可穿戴在手腕、脚踝和头部的无线传感器组成的系统。数据被传输到池边的笔记本电脑中，笔记本电脑可以同时处理多至 100 人的数据（Zarda，2010）。利用电子视频分析，系统也能用来测量游泳者转身过程中的进场时间、接触时间滑行、反冲时间和行程时间（Sage et al.，2012）。这个系统已经被美国很多大学接受并用于游泳课程。传感器也能在武术中使用，在冲击动作中测量冲击的速度和力量。

10.2.5 运动和健身的统计数据

健身数据精确和复杂的分析需求由终端用户决定。相对于专业的运动员和教练，经常需要大量生理和生物力学参数的分析，运动爱好者只需要较简单的数据分析要求。随着我们数据信息分析能力的提高，我们越来越习惯成为数据消费者。业余爱好者和专业人士之间的期望差距正在减小，特别是业余爱好者更加投入了。事实上，无限量访问数据和信息几乎已经成为一个基本的期望。正如前面提到的，随着知识和分析可以自由地在小组成员之间共享，社交媒体正在推动健身统计数据的复杂化。

传感器的原始数据输出可以使用专门的算法分析，挖掘数据中有趣的内容。但是这种分析最多只能包含该段数据的内容。需要重点考虑的是，传感器特别是惯性传感器，具有一些局限性，而这些局限性与某些类型的运动密切相关。举个例子，很多通用的加速度计在 2 ~ 9*g* 额定范围内，这些对跑步等活动是足够的。但是，篮球、棒球、板球和高尔夫球等运动的离心加速度可能会超过这些传感器的测量范围。又如，比较快的板球手前臂产生的加速度可以超过 70*g*（Wixted et al.，2010）。市售的专用加速度计可以承受超过 100*g* 的加速度，但其价格对消费级用户来说过于昂贵。

必须意识到，大部分可穿戴式健身传感器都不是百分百准确的。其性能可能比体育诊所的桌面级系统差一点，但差别很可能相对较小，可能只有精英运动员才会注意到这些差别。当然，利用任何形式的人工估计，大部分传感器都能提供优越的精度，例如心率测量（Wixted，2012）。

多年来，数据和统计信息已经变成职业运动不可分割的部分。击球率、得分和进球数等表现指标被定期更新。这些指标代表着运动员的表现。传感器可以用于深入研究这些表现是如何达到以及如何提高的。在比赛和训练都应用传感技术作为辅助。在团体运动比赛中，英式橄榄球联合会和澳式足球都要求运动员要穿上带有 GPS 传感器的衣服以便追踪其在球场上的跑动距离（Wisbey et al.，2010，Waldron et al.，2011）。传感器还可以在整个比赛中提供运动员的位置、速度等数据。在训练中，团队成员也可以穿上心率监测仪测量心率情况和一次训练后的恢复情况。这些数据让教练可以识别团队中谁出现了疲劳的早期症状，决定是否需要休息或额外训练。识别疲劳的早期信号并介入处理可以避免受伤，对高薪运动员来说这是必须关注的。职业和业余的运动员以及他们的教练开始使用丰富的传感器数据集找到超过他们对手的竞争优势。在很多方面改善轻微的性能导致累积的大幅改进，“边际收益”理论在竞技体育中越来越重要。传感技术和优势数据分析帮助运动员和教练找到进行定量化改进的可行方法。

在个人健身方面，量化自身（Quantified Self）运动不仅仅是简单的追踪跑步或骑车的距离和时间。业余运动员越来越被数据驱动。从可穿戴传感设备获得的更

复杂的数据集和先进的统计分析把数据化提高到更高水平。运动传感器子系统让我们拥有数据去分析每天的活动。每天花了多少时间坐着、走路、运动和睡觉？这与制定的运动目标差距多少？30min 的跑步和打篮球哪个消耗的能量多？

大量生物力学和生理参数可以被计算出来。一些参数是所有活动都会涉及的，而另一些则是某些活动所独有的。最通用的健身参数如下：

- 运动距离。
- 速度（最大速度、平均移动速度和整体速度）。
- 时间。
- 心率。
- 节律。
- 消耗的卡路里数。
- 总能量消耗。
- 圈数测量。

这些统计数据可以用来提供对这些问题的判断：我多少时间在锻炼？我是否在提高？哪个活动导致热量燃烧最多？我是否达到今天的目标了？量化自身等运动通过传感、数据和统计增加了我们对自己的认识。

除了在训练和提升表现中使用，传感器数据和统计数据越来越多地在传播媒体中使用以增强观看体验。数年来，一级方程式赛车和美国赛车协会（NASCAR）等已经在屏幕上将车载传感器（加速、制动和应力等）传来的数据进行实时展示。低功耗、小尺寸的无线传感器出现后，现在可以把从运动员处获得的实时数据进行传播了。

在家里，观众将可以看到某个人的表现以及与其他人相比较等高度细化的统计数据。在未来，在球场或赛道上可能无藏身之地。转播英国的英超足球的天空体育已经提供了从录像分析所得的大量球员表现数据。如果传感器被放置在播放器中，观众可能很快就能获得每个运动员的冲刺速度、在比赛过程中的能量消耗和带球中的加速度等。这可能使比赛对足球迷来说更加引人入胜。在 2012 年 7 月的美国职业足球大联盟（MLS）全明星赛有一个尝试。队员们配备了来自阿迪达斯的可穿戴式传感器，让观众通过他们的 PC 或平板电脑跟踪球员个人表现的统计数据（Householder，2012）。

10.3 活动与保健

与健身传感器一样，活动与健康监测设备具有相同的动作感应功能。在许多情况下，它们之间的区别是模糊的。主要区别在于，活动监测设备鼓励久坐的人们去运动，并保持有利于他们的健康和状态的最低水平的运动。活动和热量平衡是健康的重要因素，此外，其他通过传感器来捕获的测量数据被添加到基本行为相关的测

量中。这些测量包括睡眠质量测量，这是临床证明的个人健康因素之一。这一类的热门设备如下：

- Fitbit 公司的产品范围包括夹式或手腕佩戴的活动监测传感器和睡眠跟踪器传感器。例如，腰带夹 Fitbit One 重量只有 8g，同时具有加速计和高度计传感器。该传感器追踪走过的步数、行走的距离、消耗的卡路里、爬楼梯和最近的活动。它也可作为显示时间的手表。它可以使用智能蓝牙连接到一个免费的手机应用、平板应用和 Web 门户。该门户网站允许用户查看他们吃过的东西，并从数据库里找到食品和相关卡路里含量。虽然不完美，但它给了关于热量的摄入与热量的消耗的有用的指示。Fitbit Force 是带 OLED 显示屏的腕带，提供了最新的统计数据，如走过的步数、行走的距离、消耗的热量等，类似 Nike + FuelBand。该腕表还装配了 NFC，智能手机等具有 NFC 功能的设备只需放置在腕表附近，即可立即下载数据。该腕表的睡眠监测功能与临床活动记录仪传感器相似，这是在睡眠监测实验中常用的。

- Jawbone Up 具有与 Fitbit Force 相似的腕带外形，并设计成可全天候佩戴。它本身的定位是通过提供睡眠、全天候的行为和饮食的追踪帮助用户建立健康的生活方式。Jawbone Up 取消可视显示器以减小尺寸和重量（小于 23g）。它是防水的并可以穿着淋浴。腕带提供了标准的计步器功能，能够检测步数和测量整体活动水平。数据从腕带通过电缆发送到 iOS 或 Android 移动设备。移动设备上的支持应用可计算各种统计数据，包括燃烧的卡路里数量（基于年龄、身高和性别）、总活动时间、最长活动时间、最长空闲时间和睡眠时间等。它还提供了查询消耗热量的门户网站途径。该装置具有震动的功能，如果在指定的时间限制之后没有检测到运动它就会震动警告（Bennett，2012）。

智能手表的概念已经以各种形式存在了多年。随着新智能手表的诞生，如集成惯性传感器的三星 Galaxy Gear 和 Pebble，智能手表的概念在今年得以复苏。以下是两个智能手表的发展。

- 来自摩托罗拉公司的 MotoActv 智能手表面向运动和活动监测市场。与许多包括来自耐克、Timex 和 Garmin 的运动 GPS 腕表一样，MotoActv 提供了大量重要的附加功能。它基于 Android 系统，提供包括音乐播放器等多种应用程序，能无线上传用户的健身数据（包括 GPS 轨迹）到其网站。该腕表还可以通过 ANT 或智能蓝牙连接到其他健身传感器，如心率监测器。锻炼的数据可以使用手表的 Wi - Fi 无线与 Motoactv. com 同步。该手表还有运动和活动模式，如跑步、健身房锻炼、散步和骑自行车等（Maker，2011）。

- 芬兰 Vivago Oy 公司的 Vivago Watch 专注于 24h 健康监控。手表连续测量运动、体温和皮肤传导率等生理信号。在使用过程中的开始阶段，手表和支持软件学习穿用者的活动模式。该系统在学习阶段之后，如果检测活动模式发生显著改变，它在一个预定时间段之后会自动警报。该腕表还测量实时活动并可以查询历史。相

比于前四周的平均值，如果体力活动增加或减少了，它会将这些信息告知用户。该腕表还跟踪全天候卡路里消耗量及睡眠质量和时间。睡眠监测还伴有智能闹钟功能，旨在在睡眠较轻阶段唤醒用户，这会提升苏醒的状态（Vivago，2013）。

另一种健康监测的方法中，把传感器直接集成到服装里面。这些传感器可直接从穿用者的身体采集数据，例如生理、生化和生物力学等数据。具体例子如下：

• First Warning Systems 公司正在开发一种乳腺组织筛查文胸。传感器分层分布的文胸可测量由于血管生长和肿瘤生长而产生的生理节律性温度变化。新加坡南洋理工大学和 Lytix 公司共同开发的预测性分析软件旨在区分乳腺内原本健康细胞的异常形态。这个数据可供临床医生参考，作出临床决策。在三个临床试验组中，胸罩正确识别 92.1% 肿瘤，而常规乳房 X 线检查只有 70% 的准确度（First Warning，2012）。另外，作为一个概念，Electrifoxy 公司开发了 Modwells 个人健康监测系统样机。该系统包括被称为 mod 的输入输出对象，这些对象都将被穿在身上。mod 是收集环境或生物数据集的传感器模块。该公司已经展示了一款样机概念用于评估。展出的服装包括拉伸感应技术“eTextile”，与 mod 连接的。mod 用于控制服装和收集数据。服装的拉伸感应功能允许身体在各种方向上的移动测量。mod 处理数据，如果姿势不符合定义的目标，它会发出触觉警报（Electricfoxy，2013）。虽然有投机性质，但是它为传感器技术融入日常生活用以改善健康提供了实用的见解。

10.3.1 肥胖与体重管理

在西方世界，肥胖被认为是重大公共卫生问题。在美国，据估计有 2/3 的人口超重，包括 35.7% 被认为肥胖。儿童中，这个问题也越来越大，估计 2 ~ 19 岁的孩子中有 16.9% 为肥胖（CDC，2012）。传感器及附带的技术被越来越多地用来在体重管理计划中，用来监测个人的参与和提供坚持的动力。健身市场和体重管理市场所利用的传感器技术有显著重叠。早期的设备是基于标准计步器开发的，能手动或通过 PC 把数据传送到 Web 门户网站。最近，基于微机电系统（MEMS）的惯性传感装置如 Gruve（www.gruvetechnologies.com）正在进入体重管理领域。数据从传感器采集而来，被传送到专门为定制的减肥和管理项目而设计的 Web 门户网站。这些项目基于数据追踪和可视化、在线教练和营养管理。特别对于减重项目而言，这种传感应用方法的一个局限在于卡路里消耗的准确性。在物理行为中，加速度计收集的关于高能量消耗但低动作幅度的运动（如举重）的数据会被低估卡路里消耗（Cready et al.，2013）。

多传感器的方法可能是一个更精确的测量卡路里消耗的方法。除了标准的基于加速度计开发的惯性传感器，BodyMedia 臂章身体监测系统含有皮肤温度传感器、热通量传感器和皮肤电反应（GSR）传感器。GSR 提供了某种机制来确定你有多少通过改变皮肤的导电性而产生的出汗。皮肤温度也反映活动水平。最后，热通量

传感器确定多少热量是由肌肉产生并辐射到周围环境中。总的来说，由传感器的数据得出的卡路里消耗量声称误差小于 10%。此外，该传感器模块还能测量睡眠的时间和质量。有越来越多的证据显示体重增加或减少与睡眠之间是相关的，因为它们都受体内激素水平特别是瘦素和生长素释放的影响。这些激素是负责刺激和抑制食欲的。它们的产生可影响体重和睡眠质量。在减重项目中，睡眠传感器可能发挥日益重要的作用。睡眠数据将被用于提供分析生活方式和行为正在对一个人的体重增加或减少产生的影响。下一节将更详细地叙述目前的睡眠传感方法。

另一个检测卡路里消耗的方法是间接测热法。这个方法被世界卫生组织、美国营养学会和美国运动医学会推荐用于治疗肥胖和体重管理。如先前所描述的，便携式热量计现已提供准确代谢跟踪功能，在体重管理方面有一定的应用。惯性检测方法在不同环境下测量是有困难的，比如在平坦的地面上还是在 20% 坡度的斜坡上跑步。视情况而定，间接测热法会告诉你身体是不是在努力工作。便携式热量计的缺点在于测量是不连续的，仅提供某个瞬时状态。但是，它确实提供准确计算你消耗了多少卡路里的基准方法。

在体重和肥胖管理等式的另一侧是确定你正在消耗多少卡路里。由于各种变量需要确定，实现任何准确度都是极具挑战性的。然而，现有大多数产品，在其门户网站以某种形式输入你的食物摄入量。你通常可以选择从带有热量值的预设数据库中选择食物。或者你也可以根据原料和数量添加自己的膳食信息。虽然这种做法是不完美的，但这个过程也是有用的，可以让人们在没实现完全精确测量前了解他们消费了多少粮食。

10.3.2 睡眠

越来越多的证据表明睡眠对身体健康、心理健康、甚至是体重控制的影响。睡眠的测量，特别是睡眠质量的测量，是具有挑战性的。用于测量睡眠的金标准方法是多导睡眠图（PSG）。这种方法测量包括心电图、脑电图、血氧饱和度和呼吸模式等指标。尽管其精确度很高，但该方法有许多明显的缺点。首先，受试者需要接很多电极。病人往往是不舒服的，这也扰乱了他们的睡眠。它还要求病人在专科睡眠诊所过夜，这是昂贵的，并且受试者不在熟悉的环境中，这又可能影响数据。然而，所收集的数据可以用于睡眠分期判定，这在计算快速眼动和非快速眼动睡眠的比例的时候很重要。多数成年人中，快速眼动睡眠应占总睡眠的约 20% ~25%。不好的睡眠习惯和不好的睡眠质量会有很多问题伴随着：

- 记忆受损和思维中断。
- 沮丧。
- 免疫能力下降。
- 疲劳。
- 痛苦。

- 体重增加。
- 创造力下降。

除了对健康的影响，睡眠障碍也可能是早期健康不良和功能性失调的标志，尤其是老年人。抱怨睡眠问题在 65 岁以上年龄老人中尤为普遍，超过 50% 的人抱怨睡眠少、频繁醒来、醒来太早和白天打盹等问题（Miles et al.，1980）。

鉴于睡眠在健康模型中的重要性和多导睡眠图法的局限性，传感器技术在家用睡眠检测方面的应用引起越来越多的关注。早期的设备使用手表状的由双轴加速度计组成的体动记录仪。每个晚上来自传感器的睡眠数据存储在本地设备上，需要下载到 PC 进行分析。数据的分析报告了一个预定义的时间内的运动情况，如图 10-6 所示。上部的图形显示了时间和个人活动强度。下部的图形显示累计一段时间的活动强度。低水平的活动可能与非快速眼动阶段有关，而高水平活动时期可能表明受试者是清醒的。睡眠到唤醒阶段估计是使用基于回归算法计算的。这种方法擅长识别睡眠障碍，但是不能用于睡眠分期，因为缺乏了睡眠质量的测量，这种局限可以通过呼吸或心电图传感器估计快速眼动和非快速眼动睡眠阶段来解决。

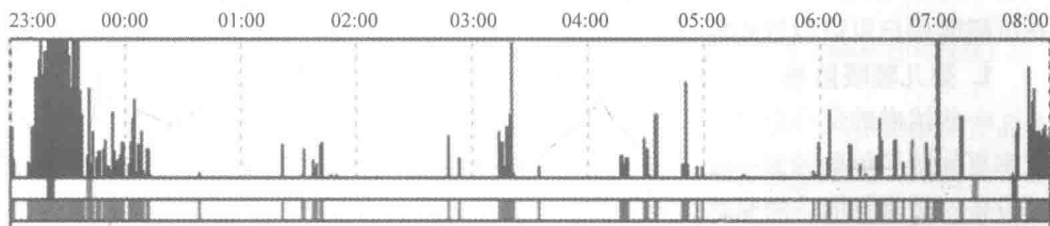


图 10-6　一组 9h 睡眠的体动记录传感器数据

虽然体动记录仪记录的睡眠数据是有用的，但它要求受试者每个晚上都戴上传感器。非接触式的方法具有无须受试者参与操作的优点。检测方法包括称重模块（Austin et al.，2012）、以雷达为基础的技术（Vasu et al.，2011）、力敏电阻器以及无线惯性传感器（McDowell et al.，2012）。Walsh 等人已经开发了一个床垫压力传感器，如图 10-7 所示。把 24 个光纤传感器嵌入到垫子里，用于在睡眠时检测身体的位置和运动。以老年患者的家庭为基础的研究中，与使用行为记录仪的手表拍摄相比，实验展示了该方法监视床上行为的精确的时间分辨率（Walsh et al.，2008）。

以消费者为中心的 Zeo 公司开发了睡眠监测系统，采取了多导睡眠图的方法，通过跟踪大脑活动监测睡眠。该系统包括睡眠时戴的一个轻量级无线头带。数据从头带流向床边的显示器或智能手机。汇总数据被发送到一个门户网站进行在线分析。门户网站有大量附加功能，例如一个睡眠日志，用于识别生活方式的影响和睡眠质量之间的关联。系统还有智能唤醒功能，寻找最自然的唤醒时间点，把你从睡眠中轻轻地唤醒，而没有昏沉的感觉。不幸的是，该公司因经济困难在 2013 年初

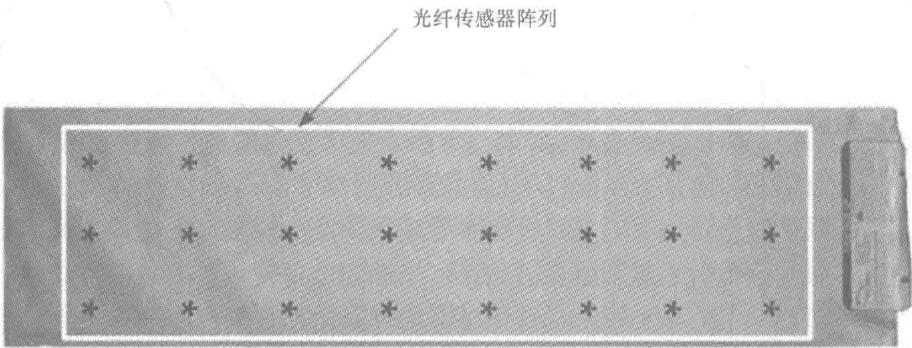


图 10-7 床垫压力传感器

倒闭了（Dolan，2013）。应用程序，如 Sleep Cycle Alarm（Maciek - Drejak - Labs，2013），使用智能手机的集成加速度传感器作为活动记录仪监测睡眠质量。智能手机被放置在人的床垫下并校准以检测运动。该应用程序声称，在睡眠期间，能通过测量人运动的强度间接检测快速眼动和非快速眼动睡眠。当进入一段浅睡眠而不是在沉睡时用户可以设置闹铃唤醒自己。

1. 婴儿睡眠监测

一些忧虑的父母总是担心他们的孩子睡眠时的健康状况。而媒体报道的婴儿猝死率更加剧了他们的这一忧虑。于是，在传感器技术领域出现了一种监测婴儿睡眠的设备。最常见的方法是通过声音监测判断婴儿是否在睡觉或是监测婴儿周围的环境温度。然而，随着技术的发展，越来越多更为先进的传感器出现了，它们可以通过接触或非接触的方式监测婴儿。

一种方式是在婴儿的床垫下面放置压敏垫。如图 10-8 所示的 AnglecareAC401 传感器系统，当婴儿睡眠时，置于床垫下方的传感器会对婴儿进行持续的监测。如果持续 20s 没有监测到婴儿的动静，系统就会向父母发出警报。该系统还具有声音监测功能，以加强对动作感应的能力。此外，该系统还配备了室温监测功能并设有温度上、下限警报。总的来说，这些感应功能给父母们带来了一定的安全感，特别是那些对婴儿猝死综合征（SIDS）深感担忧的父母。

当婴儿躺在床垫上时，其对床垫的压力一般是通过压阻式传感器或光电传感器监测到的。当使用压阻式传感器时，电阻变化率与受到的压力相关，而婴儿对床垫的压力在其呼吸或是移动时会发生改变；当使用光纤传感器时，传导光纤和接收光纤在封闭腔内形成闭环。当该封闭腔受到外界压力变得扭曲时，接收光纤接收到的光和压力的比例会受到影响。这时垫子上的传感器会连接到一个聚合单元，并由这个聚合单元处理传感器读数。如果在规定的一段时间内没有监测到呼吸或是呼吸很弱的话（每分钟呼吸次数大于 10 次），系统就会自动向父母发送警报。

第二种传感方式是婴儿穿戴式的。将一些传感器芯片植入婴儿的衣服或是尿片



图 10-8 Anglecare 公司的活动与睡眠床垫式传感器（图片已获得 Anglecare 公司授权）

中。这些芯片用惯性传感的方法来监测婴儿胸部或胃部的移动。许多类似的产品都配备有一种内置的触觉刺激器，一般情况下，15～20s 内没有监测到婴儿活动，这个刺激器就会被触发。如果触发刺激器后仍无法监测到婴儿活动，系统就会发出警报。与身体的正确接触对于避免错误警报至关重要，并且这种接触方式是因人而异的。与置于床垫下的传感器相比，这种传感器的关键优点在于它的可移动性，而且前者的性能还会受到床垫型号和厚度影响。

在研究领域，已经有多种婴儿监测方式被研发出来，其中包括一款集脑电、呼吸、湿度和温度监测为一体的婴儿背心（Linti et al. 2006）。最新的研究是一款名为 Exmobaby 的智能套装。它配备了温度计、心率监测仪以及运动传感器。这件衣服还具有湿度传感器，以显示婴儿是否需要更换尿片。一个 ZigBee 发射器被牢牢地固定在衣服上用来将传感器的数据传输到接收 PC。PC 上的应用软件将会对这些数据进行处理并上传到网站上。用户可以通过手机软件上网查看。如果用户有需要，网站也会发信息或是电子邮件提醒。还有一些其他的研究，例如脉搏血氧饱和度监测（Rimet et al.，2007），无线音频传感（Al－Dasoqi et al.，2010），以及 UWB 雷达传感（Ziganshin et al.，2010）等。

2. 睡眠呼吸暂停综合征

睡眠相关的困扰，包括失眠、下肢不宁综合征、打鼾、异态睡眠和睡眠呼吸暂停综合征。睡眠呼吸暂停综合征是比较常见的，男性发生率多于女性。英国的研究估计，大约 4% 的中年男子和 2% 的中年妇女受到这种疾病的困扰。如果不进行治

疗，后续有可能导致高血压、心脏病发作、中风、肥胖和 2 型糖尿病（NHS，2012）。此外，睡眠呼吸暂停综合征会导致白天嗜睡，这可能导致事故、生产力损失等问题。值得一提的是，睡眠呼吸暂停综合征通常与超重有关。

睡眠呼吸暂停综合征的症状是睡眠时呼吸暂停。最常见的一种睡眠呼吸暂停被称作阻塞性睡眠呼吸暂停综合征（OSA），其被定义为病人气道发生 10s 或更长时间的阻塞。多导睡眠图是 OSA 诊断金标准，然而，在 2008 年，FDA 批准了家庭睡眠监测作为睡眠呼吸暂停的诊断工具。家庭睡眠监测采用了多种传感器，监测参数如下：

- 气流（基于压力）。
- 血氧饱和度（脉搏血氧饱和度仪，通常是 0.1% 的分辨率）。
- 心率（心电图）。
- 呼吸强度（呼吸感应描记法）。

此外，强烈建议监测以下参数：

- 基于温度传感的气流（热敏电阻器）。
- 打鼾模式（声学麦克风）。
- 肌肉运动（肌电图）。
- 头部动作/位置（惯性传感器）。
- 身体位置（惯性传感器，仰卧或者非仰卧睡姿）。

据报道，家用传感器平台可以提供堪比多导睡眠图的精度。例如，来自 Watermark Medical 公司的 Ares Unicoder 系统与多导睡眠图同时监测时，结果相关性达到 0.96，当其做家用睡眠监测时，与多导睡眠图结果相关性达到 0.88（Westbrook et al.，2005）。其他家用睡眠监测解决方案包括 Stardust Ⅱ Sleep Recorder（www.stardust2.respironics.eu）、飞利浦公司的 Alice PDx 便携式睡眠诊断系统（www.alicepdx.respironics.eu）、Cleveland Medical Devices 公司的 SleepView（www.clevemed.com/SleepView/overview.shtml）和 NovaSom 公司的 AccuSom（www.novasom.com）。

当被诊断为轻度的睡眠呼吸暂停综合征时，治疗方案通常是改变不健康的生活方式，包括减肥、戒烟和限制饮酒等。在中度至重度的情况下，持续气道正压通气（CPAP）是治疗睡眠呼吸暂停综合征的常用方案。具体方案是让病人戴上面具，持续供应压缩空气。压缩空气可以防止咽喉气道阻塞。传感技术在这些机器的操作中起着关键作用。精确的基于微机电系统（MEMS）的压力传感器监测机器输出和呼吸面罩中的瞬时压力。这些数据用于动态地调整空气压力以保持治疗所需的预先设定的压力值。这样的方式满足了某些特殊使用者的精度和灵敏度要求。某些情况下，压力数据可以用于识别特殊的治疗需求。除了压力治疗，CPAP 机器可以获得每晚治疗持续时间、漏气率、压力设定、呼吸暂停时间和浅呼吸时间。这些数据可以帮助临床医生为每个病人定制治疗方案。

10.3.3　姿态监测

在成年人中，背部疼痛是一个普遍存在的问题，在他们的生活中，有 80% 的人中会在某一时候腰痛，而有 20% ~30% 的人在任何时间腰痛（Virutal Health Care Team，2012）。据美国疼痛医学学院报道，在美国，40 ~65 岁年龄段的工人，他们的背部疼痛每人估计一年会花掉雇主 74 亿美元。也有迹象表明，背部疼痛有增加的趋势。但这种增加趋势的原因尚不清楚，如肥胖这样的因素和伏案工作的人数增加也有可能造成（UNC School of Medicine）。背部疼痛经常可以成功地通过一些组合运动、非手术治疗方法、另类疗法来解决。对于一些慢性背部疼痛的患者来说，或许植入式神经刺激设备可提供一个解决方法，这种装置是通过将温和的电信号送到脊柱附近的硬膜外腔来实现的。姿势不当已被确定为引发背部疼痛的一个重要问题。通过健康的姿势使脊柱保持在强有力且稳定的位置是很重要的。弯腰和懒散的姿势背离了脊柱的三个自然曲线（颈曲、胸曲和腰曲）。结果是背部肌肉和韧带因此过度劳损，他们为了努力保持姿势平衡而导致了背部疼痛、头痛和其他相关的问题。

惯性传感也在扮演一个干预的角色，尤其在姿势监测应用程序中，如图 10-9 所示。已经有大量的产品，如 Lumoback，可以用来监控和改善姿势。当穿戴者处于懒散的姿势时，Lumoback 传感器是通过穿在背部来提供振动方法进行反馈。这种传感器通过蓝牙智能连接，在智能手机应用程序上提供实时姿态追踪。这种传感器可提供骨盆倾斜的校准和由于腰的位置、身体前倾、后倾或者重量不平衡而倒向一边的懒散状态的追踪（Lasky，2013）。

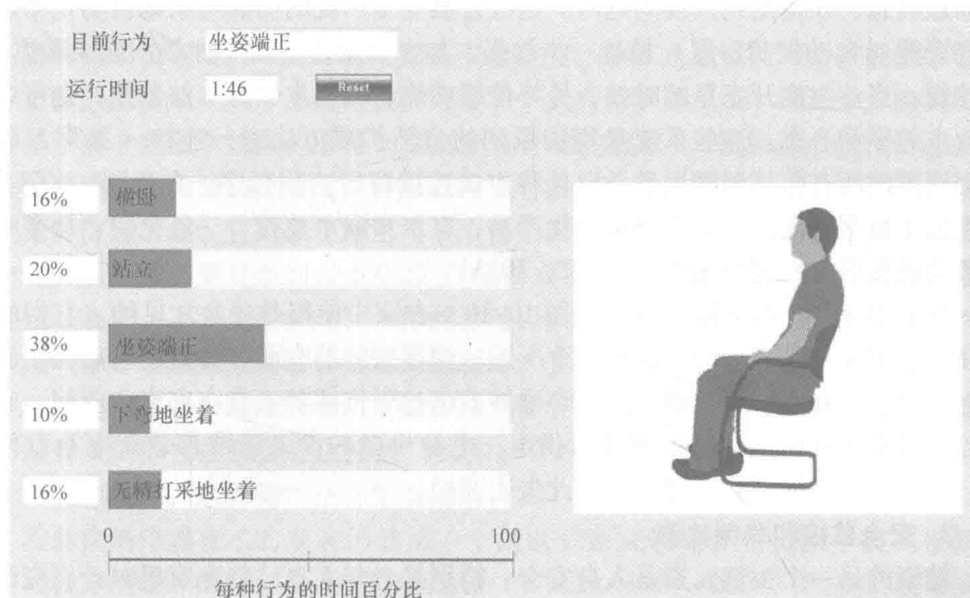


图 10-9　利用惯性传感器进行姿势监测和分类

飞利浦公司的 ErgoSensor 监视器是使用光学 CMOS 相机来确定屏幕和坐的时候颈部角度的距离。当你姿势不正确的时候，屏幕上会向你提供一个警告（Chang, 2012）。在文献中提到了其他的姿态检测方法，包括智能服装展示集成加速度计和陀螺仪（Wong et al., 2008），嵌入到鞋中的力敏电阻（FSR）（Sazonov et al., 2011）和压电“e-纺织品”靠垫（Wenyao et al., 2011）。

10.3.4 人身安全

传感器的应用让我们的生活更加安全。传感器可以通知我们房屋中潜在的危险状况，如冒烟或一氧化碳的存在。它们还可以帮助保护我们的家庭和通知我们一些潜在的闯入或入侵者。当我们经历一场事故时它们甚至可以发现。当发生事故时，如出现跌倒，传感器可以用来识别危险事件的发生和启动预防措施来保护我们以免受伤害。传感器也可以主动地用于确定我们是否在满意的身体状况下进行日常活动。老年人可以用此来测试他们的平衡，以确保在离开家之前或在花园散步时状态足够稳定。一个喜欢在家或外出与酒精饮料打交道的人，开车前测试你的血液酒精含量，这带来的巨大好处也是显而易见的。

1. 家居安全监控

家居安全监控包括各种传感功能，从传统的家庭安全监控到周围的环境监测，再到与健康有关的事件检测和响应。PIR 运动传感器可以在房间里检测运动，磁或振动传感器连接门窗可检测到改动。这些传感器可以使用视频监控提供持续的监控或通过 PIR 传感进行运动激活监控。家庭安全系统正在使用“智能”功能，这可允许人们远程监视他们的家庭。监控可以包括访问实时视频流和接收警报的能力，比如短消息，在检测到入侵问题时。这些智能安全系统的功能与家庭自动化功能或家庭智能（自动控制房屋）被进一步加强，如光和暖通空调（加热、通风和空调）的控制。当业主离开家里的时候，另外传感功能，比如水和漏水的监控，也可以增加业主的平和心态。这些系统是用物联网的自然扩展方法进行连接（见第 5 章），我们周围的所有传感器和设备是以某种方式连接智能应用程序。在美国，AT&T 最近推出了数字生活家庭安全与自动化产品，有水和漏水监控、一氧化碳、烟雾检测和玻璃破损的特性传感功能（AT&T, 2013）。

这么多年来，烟雾报警器（见图 10-10）在家中使用是非常常见的，它们的安装在许多国家中是合法的。如第 2 章所述，烟雾探测器有两种类型：电离探测器和光电探测器。对于一氧化碳检测，半导体或电化学传感器通常在家庭中应用。它们可以通过电池或由家里的电源进行供电。电源供电的设备通常都装有电池以作备用，确保在电力网有故障时不会因此失去监控。

2. 安全监控和跌倒检测

健康的另一个关键元素是人身安全，特别是老年人自己待在家里时，更应该对他们多加关注。与跌倒相关的受伤，通常会发生在家里，这是在老年人中由于受伤

而导致死亡的最大原因。据估计，在美国，与跌倒有关的伤害每年大约花费300亿美元。在紧急情况下通知系统的使用可对老年人支持提醒服务，例如跌倒，这已成为多年的应用实例。这些系统通常会采取独立单元的形式：简单的吊坠，或有协助纽扣的袖口。一有问题，按钮的激活会通知有远程监控服务。例如AlertOne（www. alert - 1. com）、LifeStation（www1. lifestation. com）和Bay Alarm Medical（www. bayalarmmedical. com）的产品。应急监测也可以形成一个整体家庭监控服务的一部分，包括像由Life Alert Emergency Response公司提供的Life Alert Classic产品，有安全和环境传感等附加服务（www. lifealert. com）。



图10-10 家用烟雾报警器

跌倒检测设备是另一种常见的家庭安全应用，通常是建立在一个扩展医疗警报服务上的。这种形式的产品通常被称为移动个人应急响应（M - PERS）。检测设备都是基于单个或多个惯性传感器（如加速度计和陀螺仪）。使用多个惯性传感器可以降低假阳性率和提高灵敏度。传感器模块会戴在手腕或腰上，或做成吊坠。该模块配备了应急按钮，它可以在家里与一个基站无线连接。一旦触发，基站可以向监控中心发送警报。更复杂的设备集成了GSM模块，当检测到跌倒时，它会自动发送警报。或者，当发生跌倒时，该传感器可以自动通知家用基站，然后通知呼叫中心。呼叫中心联系穿戴者以评估紧急的程度。如果紧急情况被确定或没有反应，呼叫中心会向指定的护理人员和家庭通知紧急服务和警报。这种形式的方法的优点在于即使当人跌倒失去意识时也能进行操作。有些设备还配备了GPS跟踪特性，如果在外发生跌倒，这种特性是非常有用的。

跌倒检测传感技术的发展仍然是一个活跃的研究领域。在文献中提到检测方法，可在定制设计的背心嵌入惯性传感器（Bourke et al.，2008）和在手杖中嵌入惯性传感器（Lan et al.，2009）。作为潜在的跌倒检测装置，智能手机也引起了关

注，因为它们有集成惯性传感器的设备。Tacconi 等人报告了将一个三轴加速度计的使用数据嵌入在 Android 智能手机来检测跌倒并提供定时站起和行走测试（Tacconi et al.，2011）。这个测试是一种常见的临床试验，用来确定由于步态和平衡的问题引起的风险。这种方法有一个重要的限制是，智能手机必须戴在腰部的规定，这可能对于作为一个日常跌倒探测器的使用是不切实际的，尤其是对女性来说。Yavuz 等人也报告了智能手机对跌倒检测的使用。他们还利用智能手机中的谷歌地图提供 GPS 信息定位跌倒的位置。这些信息和通知的事件通过各种通知机制，如短消息、电子邮件和博客提供给护理人员（Yavuz et al.，2010）。MPOWER 实验室的 BuddyGuard 是一个商业产品，就采用了类似的方法。在 iPhone 手机上运行的应用程序提供了许多个人保护服务包括跌倒检测。当以 5g 速度跌倒时，通过手机内置的加速度计的应用程序可以自动感知。紧急警报时间为 5s，如果用户没有响应则由应用程序显示警告通知。警报会将跌倒者的位置通过电子邮件、自动电话和短消息传送给家人和朋友（PR Newswire，2011）。

尽管有很多工作以确定老年人跌倒的风险（见第 8 章），但有些工作主要专注于预防，或当跌倒发生时，减少受伤的程度。一个常见的研究方法是使用的可穿戴气囊，就如由 Tamura 公司在日本千叶大学开发的护套系统。该系统同时包含了当加速度和角速度超过阈值时，可用于触发安全气囊使用的加速度计和陀螺仪（Tamura et al.，2009）。在研究文献中，也有使用安全气囊的类似方法（Guangyi et al.，2009，Fukaya et al.，2008）。这样的设备在一般人群中使用之前必须进行处理，这还存在着相当大的实用障碍。

3. 酒精监测

我们都知道驾驶相关的损伤与酒精（乙醇）的消费有关。在许多国家中，限制喝酒的法律正在减少。其结果是，单独喝酒可能会使你超过合法喝酒的限制。路上携带和台式仪器已经被执法机构使用多年。近期开发的一种个人用酒精监测传感器已经开始应用，其中一些足够小以至可以依附在车钥匙上。在法国，从 2012 年 7 月以来在车上携带一个酒精测试工具已经是法律要求的。不久之后，这一做法也可能会被其他国家复制。基于不同的检测原理，有三种主要类型的常用呼吸酒精测试设备：

- 化学（基于酒精和其他化学物质之间的化学反应，可产生可见的颜色变化）。
- 红外（IR）光谱（intoxilyzer）。
- 传感器（燃料电池或半导体传感器）。

对于个人使用，半导体传感器是最常见的，因为它们成本低并易于集成到电子设备中。商用的个人呼吸酒精测试仪的成本只有 20 美元。在半导体酒精传感器中，金属氧化物颗粒被加热到大约 300℃。施加电压以产生一个小的稳定电流。当在呼出的酒精接触金属氧化物颗粒时，可以改变它的电阻率，从而导致稳定电流的变化。半导体传感器存在以下一些问题：

• 非酒精性特异反应。传感器可以响应的其他挥发性有机化合物，如发胶和呼吸丙酮。

• 使用寿命相对较短。

• 传感器饱和。

• 漂移。该传感器可以响应通常随着时间的增大表现出的变化。

• 非线性响应。相比燃料电池，该传感器的酒精测量具有较窄的和降低的线性范围。

燃料电池设备通常被认为是现场酒精测试的黄金标准，且被执法机构广泛使用。在燃料电池装置中，呼气样本暴露于在电池中的双铂电极。呼气样本中的任何酒精在阳极氧化成乙酸，产生电流。产生的电流与呼气样本中的酒精浓度成比例。燃料电池具有许多超过半导体传感器的重要优势。它们对酒精具有很高的特异性和敏感性。酒精的测定不能被内源性物质如丙酮（由糖尿病所产生）或周围环境的气体如一氧化碳或甲苯所影响。这些传感器通常具有五年以上的使用寿命。

最近燃料电池装置已经以合理的价格进入主流消费市场。正如本书中描述的许多其他应用领域，酒精传感器目前正在智能手机中集成。所述的 BACtrak 仪器，如图 10-11 所示，是利用燃料电池（Xtend 电化学燃料电池）供电的体内酒精含量测

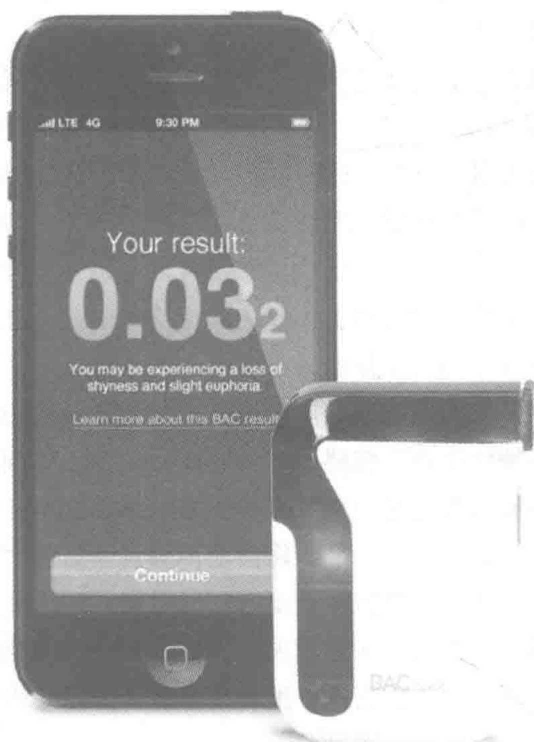


图 10-11　BACtrak 燃料电池体内酒精含量测定器（图片已获得 BACtrack 公司授权）

定器，提供了在 0.000% ~0.400% 范围内准确的血液酒精含量（BAC）的测量（一般来说，在美国酒精中毒的法定上限为 0.08%，而在欧洲，上限一般是 0.05%）。该传感器通过蓝牙（V4.0）连接到 Android 或 iOS 智能手机。所述 BAC-trak 具有内部空气泵设计，以确保精确和一致的结果。配套软件提供了大量的社交媒体功能，包括私下里通过短消息分享结果或通过社会媒体公开或者简单地删除数据的功能。其他功能还包括分享照片、备忘录、戒酒日志的能力。所提供的数据可以让用户深入了解他们的饮酒习惯，并学习他们的身体如何处理酒精（Ferro，2013）。以色列的初创公司 Alcohoot 针对消费市场，也利用了燃料电池传感器。它通过音频端口连接 Android 或 iOS 智能手机。如果报告结果高于法定上限，支持软件应用程序会自动呼叫出租车（Ferenstein，2013）。

10.4 保健、健身和生活方式中传感应用的未来

我们现在正进入需要主动管理健康才能达到全面健康的时代。正如我们在本章所看到的，传感器技术在帮助我们理解健康、告诉我们影响健康的因素等方面发挥着举足轻重的作用。传感器可以帮助我们了解久坐不动的生活习惯、暴饮暴食、不良睡眠习惯和对健康产生负面影响的行为。

独立的和移动设备集成的传感器都会继续向健康应用发展。这些应用会以主动或者被动乃至混合模式运行。对于主动模式，例如我们在某些活动期间戴上特殊的传感器，如在跑步或者散步期间，这是我们与健身和行为传感器进行交互的主要方式。在未来，大多数与传感器的交互将会是被动的。随着一些商业活动监测产品的诞生，这类传感器正在慢慢出现。这类传感器可以被携带在身上，而不会对穿戴者产生影响。这种被动的传感方式将会体现在伺机传感中，可能会出现在我们拿起手机、穿上某件衣服或开车前往工作的过程中。

虽然智能手机中集成的传感器功能越来越多，智能手机的物理缺陷将保证独立传感器只会继续用于特殊用途。传感器被集成在服装中，特别是与运动行为相关的服装中。我们也可能看到智能服装或者“e-纺织品”的加速发展，我们将看到衣服本身化身为传感器。智能服装的革新将促使传感器被更多用户认识，并从为高水平运动服务的职业领域转向日常使用的消费领域。

通用连接方案将是关键的推动力之一。传感器与智能手机的集成越来越普遍。绝大多数用于健身和保健的传感器现在配备了免费的智能手机应用。这些应用提供传感器数据的本地存储、处理、可视化和连接到基于云服务的 Web 门户网站等功能。未来将是数据推动社会。我们将更加把个人健康数据社交化来达到各种目的：团体支持从而保持努力、专家分析与建议以及获得朋友、家人的肯定。但是这些数

据的社交化也可能产生无法预料的结果。在未来，每周跟踪并通过社交媒体分享我们饮食的摄入水平可能会不必要地吸引服务供应商（如保险公司）的注意。很多人也会不顾及隐私问题就分享个人健康相关的数据，这些行为可能会在未来得到改变。Facebook 用户已经成长，但却很少考虑分享个人信息的后果。绝大多数人对健康相关数据共享的后果都是未知的。短期内，人们都会有与年龄相关的意见和看法。但是随着健康领域的发展和成熟，人们将不得不权衡数据共享的潜在好处和实际或预期的风险。技术的发展必将使我们在未来能够更好地控制我们的数据，但是，最终我们将不得不在共享什么，与谁共享和出于什么目的共享等问题上作出决定。随着个人健康数据共享相关的集体社会知识储备的建立，我们很可能会看到人们的行为和观念随着时间而推移。

无论我们在哪里，传感技术还将使我们能够主动监控家中和周围环境。我们已经有了家庭安全系统、独立的烟雾和一氧化碳探测器。未来将带给我们的智能集成系统，能够主动监控、管理、远程启用动态管理，还能主动与我们沟通。我们的家庭会拥有物联网，而我们的生活将更有意义并产生实质的改变。我们所在的物理环境将适应我们，例如调整卧室的温度保证适合晚上睡眠，在浅睡眠时唤醒我们以保证起床后精力充沛，晚上自动打开去洗手间的灯等。未来，我们将以无形、不间断的方式管理个人健康，让我们能保持健康、积极，并与家人、朋友和同辈愉快的交往。传感器、移动设备和通用连接方式在创造这段未来的路上扮演重要的角色。

10.5　小结

本章关注了传感器如何在广泛的运动和行为监测中被越来越多地采用。作为保健传感器，其中的很多传感器采用相似的传感器原理，能测量相似的参数。随着人们更加主动地投入体力活动中，这些技术被更多地利用。用户也对与同辈、朋友和家人在线分享这些活动更感兴趣。我们也将看到传感技术如何被集成到服装中，以及这种技术如何针对身体准确位置测量应用。传感器集成或者安装在自行车或高尔夫球杆等运动装备中也变得非常可行。在运动和健身领域使用的技术同时也被用于体重管理项目中，传感器通过提供持续的运动的数据为人们提供技术支持。通过本章，我们已经看到了传感器与智能手机集成的重要性，智能手机提供处理能力和数据的可视化，并作为远程连接的平台允许用户在网络上共享数据。最后，我们关注传感器在家中的使用，通过识别危险或在跌倒等危险发生时主动进行预警，为我们保驾护航。

参考文献

Edlin, Gordon, Eric Golanty, and Kelli McCormack Brown, *Essentials for Health and Wellness*, 2nd ed. Sudbury, MA: Jones and Bartlett Publishers, 2000.

Hettler, Bill, "The Six Dimensions of Wellness Model", National Wellness Institute Inc., http://c.ymcdn.com/sites/www.nationalwellness.org/resource/resmgr/docs/sixdimensionsfactsheet.pdf, 1976.

Edlin, Gordon and Eric Golanty, *Health & Wellness*, 11th ed. Burlington, MA: Jone & Bartlett Learning, 2014.

PRWEB. "*$975 Million Sports & Fitness Mobile Sensing App Market in 2017, Says ON World*", Last Update: 23rd May, 2013, http://www.prweb.com/releases/2013/5/prweb10758313.htm.

Bluetooth SIG Inc, "Momentum Builds for Bluetooth Smart Devices", http://www.bluetooth.com/Pages/Bluetooth-Smart-Devices.aspx, 2013.

Mascarenhas, D. R., C. Button, D. O'Hara, and M. Dicks, "Physical performance and decision making in association football referees: A naturalistic study," *Sports and Exercise Sciences*, vol. 2 (9), pp. 1-9, 2009.

IMS Research, "ANT+ to Lead the Way in Sports and Fitness but Bluetooth Smarting is Biting on it Heels", http://www.imsresearch.com/press-release/ANT_to_Lead_the_Way_in_Sports_and_Fitness_but_Bluetooth_Smart_is_Biting_on_its_Heels, 2012.

Zephyr, "*HxM™ Smart Heart Rate Monitor*", Last Update: 2013, http://www.zephyr-technology.com/products/hxm-smart-heart-rate-monitor/

Nike. "*Nike+ Fuelband*", Last Update: 2012, http://nikeplus.nike.com/plus/

Davies, Stephen, "*Amazing muscle sensor from Somaxis*", BIONIC.LY, Last Update: 17th July,2012, http://bionic.ly/2012/07/amazing-muscle-sensor-from-somaxis/

TMG-BMC. "*About Tensiomyography*", Last Update: 2013, http://www.tmg.si/en/products/tmg-products/about-tensiomyography

Coxworth, Ben. "*Breezing device tracks your metabolism and acts as a fitness coach*", Last Update: 4th February 2013, http://www.gizmag.com/breezing-indirect-calorimeter-metabolism/26096/

BodyGem, "*BodyGem RMR – Resting Metabolic Rate Test Device*", Last Update: 2013, http://metabolicratetest.com/

Harle, Robert and Andy Hopper, "Sports Sensing: An Olympic Challenge for Computing", *Computer*, vol. (June), 98-101, 2012.

Kaur, Kal. "*Smart Clothes*", Last Update: 8th November, 2012, http://www.azosensors.com/Article.aspx?ArticleID=84

Jeong, Kee-Sam, Sun K. Yoo, Joohyeon Lee, and Gilsoo Cho, "Smart Clothes for Biometrics and Beyond," in *Biometric from Fiction to Practice*, Du, Eliza Yingzi, Ed., Singapore, Pan Stanford Publishing Ltd, 2013, pp. 165-186.

Textronics. "*The NuMetrex Heart Rate Monitor System*", Last Update: 2013, http://www.numetrex.com/about/the-system

Eric, "*Adidas Performance Bra with HRM sensor*", talk2myshirt, Last Update: 2012, http://www.talk2myshirt.com/blog/archives/5668

Gorman, Michael. "*Reebok and mc10 team up to build CheckLight, a head impact indicator (hands-on)*", Last Update: 11th January 2013, http://www.engadget.com/2013/01/11/mc10-reebok-checklight-hands-on/

Belezina, Jan. "*Squid fitness monitoring shirt keeps track of your gym progress*", Last Update: 8th February, 2012, http://www.gizmag.com/squid-emg-fitness-shirt/21386/

Weiss, Chris C. "*PolyPower electrostatic film measures athletic movements, harvests energy*", Last Update: 28th February, 2013, http://www.gizmag.com/danfoss-polypower-sport-sensors/26324/

Krakauer, Hannah, "Buzzing clothes could teach you to be a better athlete", *New Scientist*, vol. 2877, pp. 19, 2012.

Bye, Elizabeth, "A Look to the Future," in *Fashion Design*, Oxford, UK, Berg, 2010, pp. 145-147.

Higginbotham, Stacey. "*You call Google Glass wearable tech? Heapsylon makes sensor-rich fabric*", Last Update: 16th May, 2013, http://gigaom.com/2013/05/16/you-call-google-glass-wearable-tech-heapsylon-makes-sensor-rich-fabric/

Darmour, Jennifer. "*Work*", Last Update: 2013, http://www.electricfoxy.com/work/

Maker, Ray. "*The ANT+ Bike Speed/Cadence Sensor: Everything you ever wanted to know*", Last Update: 2011, http://www.dcrainmaker.com/2011/07/ant-bike-speedcadence-sensor-everything.html.

Cycling Weekly, "Power meters: Everthing you need to know", http://www.cyclingweekly.co.uk/news/latest/536237/power-meters-everything-you-need-to-know.html, 2013.

Brim Brothers, "Zone - It about you", http://www.brimbrothers.com/, 2013.

GolfSense, "*Product*", Last Update: 2013, http://www.golfsense.me/pages/pro#a1

3BaysGSA. "*3BaysGSA Putt - How it Works*", Last Update: 2013, http://www.3bayslife.com/gsa/product.php?pid=103i#how_it_works

Sport Sensors Inc., "The Leader in Affordable Sports Radars", http://www.sportssensors.com/, 2013.

Chaganti, Vasanta and Leif Hanlen. "*Smart sensor save swimmers seconds*", Last Update: 15th June, 2011, http://theconversation.com/smart-sensors-save-swimmers-seconds-1687

Zarda, Brett. *Stopwatches? Sensor Technology Puts the Laptop in Lap*, The New York Times, New York, http://www.nytimes.com/2010/07/19/sports/19swimming.html?_r=0, 2010.

Sage, Tanya Le, *et al.*, "A Multi-sensor System for Monitoring the Performance of Elite Swimmers," in *e-Business and*

Telecommunications, Berlin Heidelberg, Springer 2012, pp. 350–362.
Cowie, J. I., J. A. Flint, and A. R. Harland, "Wireless Impact Measurement for Martial Arts (P43)," in *The Engineering of Sport 7* vol. 1, Estivalet, Margaret and Pierre Brisson, Eds., Paris, Springer, 2008, pp. 231–237.
Wixted, Andrew, Wayne Spratford, Mark Davis, Marc Portus, and Daniel James, "Wearable Sensors for on Field near Real Time Detection of Illegal Bowling Actions," presented at the Conference of Science, Medicine & Coaching in Cricket, Shearton Mirage Gold Coast, Queensland, Australia, 2010.
Wixted, Andrew J., "Healthcare Sensor Networks: Challenges Towards Practical Implementation," in *Healthcare Sensor Networks: Challenges Toward Practical Implementation*, Lai, Daniel T. H., Rezaul Begg, and Marimuthu Palaniswami, Eds., Boca Raton, Florida, CRC Press, 2012, pp. 407–437.
Wisbey, Ben, Paul G. Montgomery, David B. Pyne, and Ben Rattray, "Quantifying movement demands of AFL football using GPS tracking," *Journal of Science and Medicine in Sport*, vol. 13 (5), pp. 531–536, 2010.
Waldron, Mark, Craig Twist, Jamie Highton, Paul Worsfold, and Matthew Daniels, "Movement and physiological match demands of elite rugby league using portable global positioning systems," *Journal of Sports Sciences*, vol. 29 (11), pp. 1223–1230, 2011.
Householder, Mike. "*Wearable sensor devices leverage MEMS motion tracking innovations*", Last Update: 28th September, 2012, http://www.eetimes.com/design/medical-design/4397350/Wearable-sensor-devices-to-leverage-MEMS-motion-tracking-innovations?pageNumber=0
Bennett, Brian. "*Jawbone Up review: An easy-to-wear and insightful fitness pal*", Last Update: 9th May 2013, 2012, http://reviews.cnet.com/wearable-tech/jawbone-up/4505-34900_7-35536649.html
Maker, Ray. "*Motorola MOTOACTV In Depth Review*", Last Update: November 9th 2011, http://www.dcrainmaker.com/2011/11/motorola-motoactv-in-depth-review.html
Vivago. "*Measure Your Wellbeing - Measure your activity and sleep*", Last Update: 2013, http://www.vivago.com/
First Warning Systems Inc., "Core Technology", http://www.firstwarningsystems.com/for-clinicians.html, 2012.
Electricfoxy, "*Modwells: personal modules for wellness*", Last Update: 2013, http://www.electricfoxy.com/projects/modwells/
CDC, "*Adult Overweight and Obesity*", Last Update: 27th April, 2012, http://www.cdc.gov/obesity/adult/index.html
Cready, Gwyn and Ted Kyle. "*Every Move You Make, Every Step You Take: How Activity Monitoring is Changing the World of Fitness and Weight-loss*", Last Update: 2013, http://www.obesityaction.org/educational-resources/resource-articles-2/exercise/every-move-you-make-every-step-you-take-how-activity-monitoring-is-changing-the-world-of-fitness-and-weight-loss
Kollias, Helen. "*Research Review: Leptin, ghrelin, weight loss – it's complicated*", Last Update: 25th February, 2011, http://www.precisionnutrition.com/leptin-ghrelin-weight-loss
Thomson, Cynthia A., *et al.*, "Relationship Between Sleep Quality and Quantity and Weight Loss in Women Participating in a Weight-Loss Intervention Trial," *Obesity*, vol. 20 (7), pp. 1419–1425, 2012.
Miles, Laughton E. and William Charles Dement, *Sleep and Aging*, vol. 3. New York: Raven Press, 1980.
Austin, Daniel, *et al.*, "Unobtrusive classification of sleep and wakefulness using load cells under the bed," in *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2012 Annual International Conference of the IEEE*, 2012, pp. 5254–5257.
Vasu, Vishalini, Conor Heneghan, Sakir Sezer, and Thianantha Arumugam, "Contact-free Estimation of Respiration Rates during Sleep," presented at the Irish Signals and Systems Conference (ISSC), Dublin, 2011.
Lokavee, Shongpun, Theerapom Puntheeranurak, Teerakiat Kerdcharoen, Natthapol Watthanwisuth, and Adisom Tuantranont, "Sensor pillow and bed sheet system: Unconstrained monitoring of respiration rate and posture movements during sleep," in *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2012 IEEE International Conference on*, 2012, pp. 1564–1568.
McDowell, Andrew, Mark P. Donnelly, Chris D. Nugent, and Michael J. McGrath, "Utilising wireless sensor networks towards establishing a method of sleep profiling," *International Journal of Computers in Healthcare*, vol. 1 (4), pp. 346–363, 2012.
Walsh, Lorcan, Sean McLoone, Julie Behan, and Terry Dishongh, "The deployment of a non-intrusive alternative to sleep/wake wrist actigraphy in a home-based study of the elderly," in *Engineering in Medicine and Biology Society, 2008. EMBS 2008. 30th Annual International Conference of the IEEE*, 2008, pp. 1687–1690.
Dolan, Brian. "*Exclusive: Sleep coach company Zeo is shutting down*", Last Update: March 12th 2013, http://mobihealthnews.com/20772/exclusive-sleep-coach-company-zeo-is-shutting-down/
Maciek Drejak AB, "Sleep Cycle", http://www.sleepcycle.com/, 2013.
Linti, Carsten, Hansjurgen Horter, Peter Osterreicher, and Heinrich Planck, "Sensory baby vest for the monitoring of infants," presented at the Proceedings of the International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks, 2006.
Waugh, Rob. *Peace for parents? New 'smart' baby suit contains sensors that tell you WHY your child is crying*, Daily Mail, http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2110999/New-smart-baby-suit-contains-sensors-tell-baby-crying.html, 2012.
Rimet, Yves, *et al.*, "Evaluation of a new, wireless pulse oximetry monitoring system in infants: the BBA bootee," presented at the 4th International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN 2007), Aachen, Germany, 2007.
Al-Dasoqi, N., A. Mason, A. Shaw, and A. I. Al-Shamma'a, "Preventing cot death for infants in day care," in *Sensors Applications Symposium (SAS), 2010 IEEE*, 2010, pp. 179–182.
Ziganshin, E. G., M. A. Numerov, and S. A. Vygolov, "UWB Baby Monitor," in *Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS), 2010 5th International Conference on*, 2010, pp. 159–161.
NHS. "*Sleep apnoea*", Last Update: 26th June, 2012, http://www.nhs.uk/Conditions/Sleep-apnoea/Pages/Introduction.aspx

Westbrook, Philip R., *et al.*, "Description and Validation of the Apnea Risk Evaluation System: A Novel Method To Diagnose Sleep Apnea-Hypopnea in the Home," *CHEST*, vol. 128 pp. 2166–2175, 2005.

Virtual Health Care Team, School of Health Professions, University of Missouri-Columbia, "Mechanical Low Back Pain - Prevalence and costs", http://shp.missouri.edu/vhct/case1699/preval_costs.htm, 2012.

University of North Carolina, School of Medicine, "Chronic low back pain on the rise: UNC study finds 'alarming increase' in prevalence", http://www.med.unc.edu/www/newsarchive/2009/february/chronic-low-back-pain-on-the-rise-unc-study-finds-alarming-increase-in-prevalence, 2009.

Lasky, Michael S. "*LUMOback*", Last Update: 15th March, 2013, http://www.wired.com/reviews/2013/03/lumoback/

Chang, Alexandra. "*New Philips Monitor Uses Sensor to Promote Better Posture*", Last Update: 4th June, 2012, http://www.wired.com/gadgetlab/2012/04/new-philips-monitor-uses-sensor-to-promote-better-posture/

Wong, Wai and Man Wong, "Smart garment for trunk posture monitoring: A preliminary study," *Scoliosis*, vol. 3 (1), pp. 7, 2008.

Sazonov, Edward S., George Fulk, James Hill, Yves Schutz, and Raymond Browning, "Monitoring of Posture Allocations and Activities by a Shoe-Based Wearable Sensor," *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 58 (4), pp. 983–990, 2011.

Wenyao, Xu, Li Zhinan, Huang Ming-Chun, N. Amini, and M. Sarrafzadeh, "eCushion: An eTextile Device for Sitting Posture Monitoring," in *Body Sensor Networks (BSN), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 194–199.

AT&T, "*Digital Life*", Last Update: 2013, https://my-digitallife.att.com/support/digitallife

Bourke, Alan K., Pepijn W. J. Van de Ven, Amy E. Chaya, Gearoid M. Olaighin, and John Nelson, "Testing of a long-term fall detection system incorporated into a custom vest for the elderly," in *Engineering in Medicine and Biology Society, 2008. EMBS 2008. 30th Annual International Conference of the IEEE*, 2008, pp. 2844–2847.

Lan, Mars, *et al.*, "SmartFall: an automatic fall detection system based on subsequence matching for the SmartCane," presented at the Proceedings of the Fourth International Conference on Body Area Networks, Los Angeles, California, 2009.

Tacconi, Carlo, Sabato Mellone, and Lorenzo Chiari, "Smartphone-based applications for investigating falls and mobility," in *Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth), 2011 5th International Conference on*, 2011, pp. 258–261.

Yavuz, Gokhan Remzi, *et al.*, "A Smartphone Based Fall Detector with Online Location Support," presented at the International Workshop on Sensing for App Phones (PhoneSense), Zurich, Switzerland, 2010.

The Street, "BuddyGuard Personal Protection Service Debuts In App Store", http://www.thestreet.com/story/11038957/1/buddyguard-personal-protection-service-debuts-in-app-store.html, 2011.

Tamura, Toshiyo, Takumi Yoshimura, Masaki Sekine, Mitsuo Uchida, and Osamu Tanaka, "A Wearable Airbag to Prevent Fall Injuries," *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 13 (6), pp. 910–914, 2009.

Guangyi, Shi, *et al.*, "Mobile Human Airbag System for Fall Protection Using MEMS Sensors and Embedded SVM Classifier," *Sensors Journal, IEEE*, vol. 9 (5), pp. 495–503, 2009.

Fukaya, Kiyoshi and Mitsuya Uchida, "Protection against Impact with the Ground Using Wearable Airbags," *Industrial Health*, vol. 46 (1), pp. 59–65, 2008.

Ferenstein, Gregory. "*This iPhone Breathalyzer Wants To Call You A Cab*", Last Update: 3rd March, 2013, http://techcrunch.com/2013/03/03/this-iphone-breathalyzer-wants-to-call-you-a-cab/

第 11 章　对人类健康的环境监测

环境在日常的健康生活中发挥重要作用。呼吸的空气、饮用的水、噪声和气候均直接影响人类生活质量、平均寿命、疾病传播和与健康相关的其他方面。

不良的空气质量关系到早产儿死亡、癌症和慢性阻塞性肺病（Chronic Obstructive Pulmonary Disease，COPD）等呼吸疾病。二手烟可能造成非吸烟者患肺癌和其他呼吸疾病（Barnoya et al.，2005，Sasco et al.，2004）。环境中的农药污染会导致男性生育力的下降（Barnoya et al.，2005，Sasco et al.，2004）。由于人口增长，全球范围内的工业、城市、交通系统、农业、能源产业都会给我们的环境增加巨大的压力。

如图 11-1 所示，如果持续对人类当前的行为不加约束的话，将需要消耗更多的资源来满足我们高耗能的生活方式，从而增大污染程度，包括排放更多的温室气

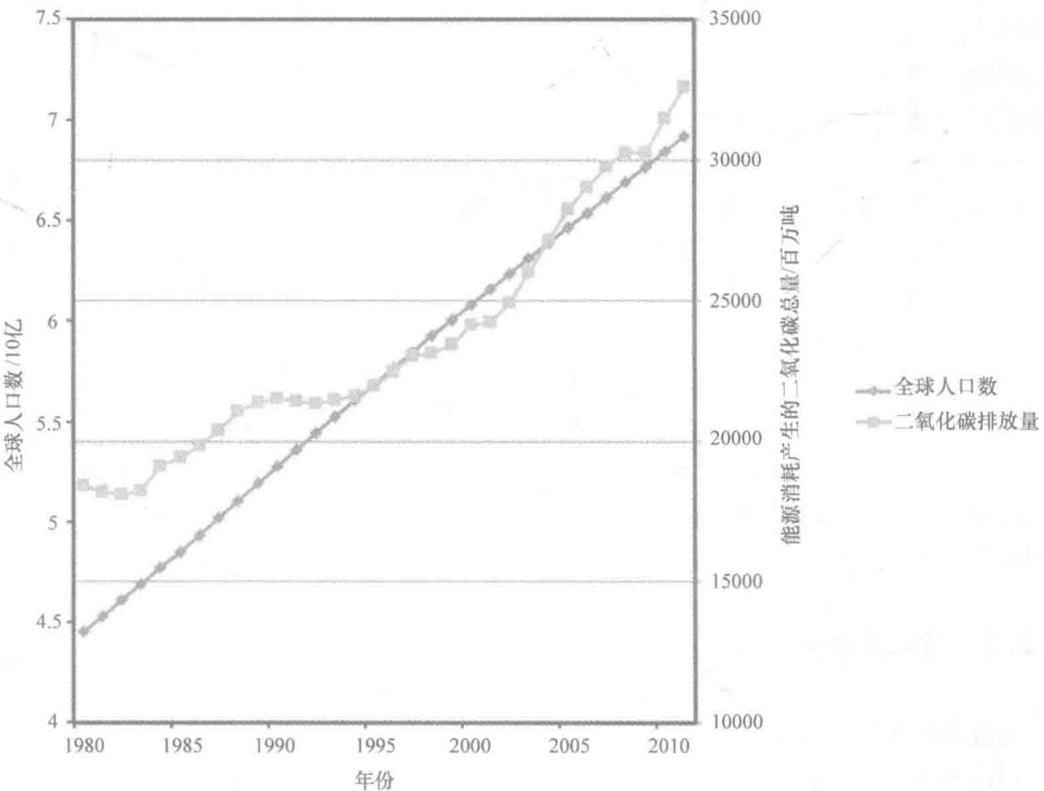


图 11-1　全球人口数及能源产业排放的二氧化碳量
（数据来源：美国能量信息管理局，美国人口统计局）

体。全球疾病负担研究表明24%的疾病归于环境因素（IHME，2013）。报告显示由于周边环境空气的污染，全球成年人死亡人数从1990年到2010年由290万增长至320万。另外，350万成年人死亡与温室气体污染有关，如燃烧固态燃料释放的室内烟雾。报告指出由空气污染造成的总死亡人数（690万）超过吸烟导致的死亡人数（630万）。然而，分析数据时，也需考虑一些其他因素的影响，例如，将吸烟或从事易患呼吸疾病职业的总人数与暴露于污染的空气中的人数对照。个人传感器将来可能会针对每个人提供量化的可避免以及不可避免的空气污染量。

环境监测主要是鉴定和测量水、土壤和空气中的化学物质、微生物，以及放射污染。周边环境监测主要针对温度、湿度和噪声程度等变量。环境监测已经发展了几十年，但目前主要的方法是现场采样后，将样本送入实验室分析。这种分析方法虽然精度高，但是费时费力，需要许多分析仪器，不可用于实验室以外，即不可拓展。从可拓展的角度，使用传感技术将实验室检测拓展到现场检测是十分必要的。现场检测已获得一些成功案例，尤其是监测空气质量方面。然而，这些传感器需要几万美元，从而限制其可扩展性，只能在特定区域内少数固定位点处使用。

正是由于对价格低廉的易扩展的传感器的需求，更多人开始考虑在政府管理或非政府管理的区域使用低成本的无线传感器来监测环境。此外，逐渐关注周边环境的人们，在一定程度上受量化环境对自己影响的观念驱使，希望能够监测周围环境的质量。普遍流行的智能手机和平板电脑使得早期的群体感知得到了发展，如今人们自己能够成为感知自我环境的移动传感器。

量化自身：使用传感器和其他计算工具分析各类数据，如饮食量、周围环境质量、运动量及锻炼质量和其他关键的健康评判指标，通过这些数据来更好地了解每天的健康状况（QS，2012）。

环境监测通常可分为室内和室外应用。典型的室内应用针对家、工作场所和办公环境内的温度、湿度、亮度级、空气质量、噪声和从安全角度考虑的烟雾以及一氧化碳含量（见第10章）。室外监测涉及很多方面，包括空气污染、水体质量、交通噪声、天气、地质事件如地震和火山爆发，以及农业相关的土壤湿度。本章我们将介绍与人类健康有关的环境监测问题。

11.1 环境监测传感技术发展的驱动力

很多技术的、社会的、经济的发展促进环境监测传感器使用量的增加。随着传感器成本的降低和精度的提高，传感器成为了在现场检测更可行的平台。另外，其形状的灵活性使得使用方式和采样地点都具有可选择性和创新性，如果使用传统传感器这是不可能实现的，并且其成本十分高。

11.1.1　产品成本

目前环境监测的主要手段是利用高成本的分析仪器在现场检测或在实验室内在线分析。这些分析仪器，如气相色谱分析仪和质谱分析仪，虽然具有高的精度和灵敏度，但是通常需要几千至几万美元。相反，市面已经存在的基于半导体、光学、电化学技术的传感器仅需几十至几百美元，这些器件能够嵌于构成无线传感器网络的独立模块中，如果具备良好的校准功能，传感器能够在特定的应用场合下成为集成化的监测仪器的低成本替代品。越来越低的价格促进了个人环境监测产品市场的快速发展，例如已有的产品 AirQualityEgg，售价在 100 ~ 200 美元之间。

11.1.2　智能手机

智能手机的广泛使用为低成本的多检测参数的环境监测传感器以及一些实际应用功能提供平台。实际应用功能包括智能手机中的麦克风就能够追踪周围的噪声；内置的 GPS 可用于定位地理坐标，这对移动式应用是十分重要的；邮件、短消息或者上网功能使得数据可共享，这有利于监测周围的环境。智能手机作为数据处理、共享、存储等过程中重要的一环，在专业和日常的应用中发挥着越来越重要的作用，尤其是将其发展为无线的环境监测传感设备指日可待。

11.1.3　市民认知

随着环境监测设备使用的推广和成本的降低，人们越来越希望能够监测自身周围的环境。在环境数据的收集和分析过程中，人们的认知、态度、行为都发生了改变。关于空气质量、饮用水、食物污染，以及明显的环境问题如雾霾等频繁的媒体报道引起了人们对环境问题的关注。尤其是城市居民开始担心户外锻炼像慢跑时，会置身于污染的环境中，而家长会担心环境污染对孩子和家人的影响，特别对环境十分敏感的老年人，相关数据详见第 9 章和第 10 章中个人健康的补充资料。现在，越来越多的人根据网上共享的数据来了解健康与环境之间的因果关系。

11.1.4　采样

环境监测通常采取现场采样，有时又被称为人工取样。样本收集在贴有标签的容器或气袋中，在一定条件下保存，并送至实验室分析。这种监测方法耗时长，成本高，无法动态监测环境中出现的瞬时污染，延时检测也会对公众健康产生潜在威胁。例如，在传染病被大范围诊断出来前，人们已经被感染了。利用基于传感器的检测方式解决了上述所有问题，也能够提前检测出污染物。然而，传感器件需要与自动化的采样系统配套使用，才能保证持续重复采样。

11.1.5 环境传感技术与网络通信技术

环境传感器通常采用无线通信，例如低功耗的 ZigBee、Wi - Fi，或 3G/4G 网络。在网状网络的节点上使用 ZigBee，多跳结构的网络比标准的星形拓扑结构覆盖的面积大。Wi - Fi 传播的距离为 100 ~ 200m（约 300 ~ 600ft），而 3G/4G 均能够传播至更远的距离。环境监测通常需要大的覆盖面积，基于无线协议的传感器能够实现大范围内的监测。然而，从经济角度考虑，在保证通信有效的前提下，合理的传感器使用密度是非常重要的。为保证可靠的通信，通常需要在使用少量高功耗器件和重叠使用大量低功耗器件间权衡（Linear - Technology，2012，Ghosh et al.，2008）。基于 IPv6 对传感器节点进行 IP 点对点连接（详见第 4 章），简化了无线传感器网络（WSN）装置将数据传至互联网的过程，实现了物联网的交互方式（Mainwaring et al.，2010）。

数据网络共享使得具有环保意识的黑客基于网络平台和移动应用程序向大众传播环保理念。同时，IPv6 网络的设计人员和用户可利用保护生态系统的工具配置和管理网络系统。

黑客：利用计算机、网络、大众媒体和其他数字工具实现目的。黑客充分利用言论自由的观念，实行各种游离在法律界限边沿的活动。支持环保的黑客分子利用传感技术搜集到的数据来推广某个特定的观点，旨在唤起公众环保意识，向政府施压，希望政府实施保护环境的相关政策。然而，支持环保的黑客仅局限于在一些辩论会中阐明环境监测的数据结果。我们如何教育公众选择性听取这些言论越来越重要。在数据导向的社会里，人们需要能够更好地分析科学数据来得出自己的观点，批判家需时刻保持理性的思维和怀疑的态度，从而保证一些假设性的观点得到充分考量和检验而不是被轻易接受。

11.2 应用瓶颈

从管理者和公众的角度考虑，尽管传感器监测环境具有巨大潜力，但其在真正广泛应用前尚需克服许多困难。其中包括功耗、稳定性、成本、制备技术、安全性、可用性、可扩展性和兼容性，本节将依次详细讨论。

11.2.1 功耗

功耗依然是一个限制应用范围的关键因素，尤其是对于附近无法提供交流电源的偏远地区，即使可实现交流电源供电，设备与电源之间的连接线路通常也是高成本的。可以采用产能设备如太阳能装置，但是较传感器本身，电源设备的成本将相

对更高。环境传感设备可能需在使用多年后才获得利润，有时需要的时间比自身的使用寿命还长。设备维护也大大增大了系统的应用成本（Zervous，2013）。除此之外，电源功耗也会影响设备尺寸，如给嵌入式计算等模块供电时会增大设备尺寸（详见第 4 章），这同时也需考虑设备的位置距电源的距离。目前普遍使用电池给网络中各个节点上的传感器供电，因此传感器的使用时间主要取决于电池的寿命。电池技术的发展以及产能装置的应用，如太阳能和微型风力机，都增加了传感器的能量来源。然而，功耗方面还需合理设计，保证在恒定的功耗下，尽可能增加工作周期和测量频率。

11.2.2　稳定性和成本

在许多应用场合下，传感器暴露于恶劣的自然环境中。传感器、电池，以及其他敏感的电子设备都需免于雨水、冰雪、尘土和其他污染的侵蚀。通过国际电工委员会（International Electrotechnical Commission，IEC）制定的标准 IEC 60529，可判断设备的防护等级（Ingress Protection Rating，IPR）（见表 11-1）。电子器件的保护等级由字母 IP 和两个数字组成，如 IP65 代表完整的保护条件或者是不完整但是符合标准的条件。第一个数字代表是否免于硬质物体的破坏，如人类和工具接触，或外源物质如尘土。第二个数字代表是否免于液体物质侵蚀，监测环境的设备该指标需达到 6 ~ 8。美国国家电器制造商协会（National Electrical Manufactures Association，NEMA）也规定了类似 IP 等级的评判标准，不同的是还要考虑腐蚀、老化和施工损害的影响。

表 11-1　防护等级

	第一个数字			第二个数字	
	人类/工具接触	硬质物体		水	放置条件
0	无特殊保护	无保护	0	无保护	
1	手背，拳头	>50mm 的物体	1	垂直滴水	气温低，小雨
2	手指或类似物体	>12mm 的物体	2	15°滴水	小雨加风
3	厚度 >2.5mm 工具或线等	>2.5mm 的物体	3	60°滴水	暴雨
4	厚度 >1mm 工具或线等	>1mm 的物体	4	任意方向溅射的水	喷洒
5	完整的保护（有限的接触位置）	防尘	5	任意方向喷射的水	居民水管灌浇
6	完整的保护	完全防尘	6	任意方向大量喷射的水	商业水管灌浇
			7	陷入 150 ~ 1000mm	陷入水槽
			8	淹没（产品允许的淹没深度）	陷入水槽 >1 个月

为了达到高的防护等级，即保护好环境监测设备，传感器可放置在密闭盒中，多个传感器则可放置在保护效果好的封闭装置内。达到标准的封闭装置往往十分昂贵，价格甚至比传感器本身还高。例如，一个小的防护等级为 IP67，即免于各种

气候侵蚀的塑料装置（15mm×15mm）需要100～200美元。随着3D打印技术的发展，更多人愿意用成本较低的注塑模具来制作低成本的封闭装置（Boisvert，2013）。然而，3D打印技术尚需完善，将来才能真正制备出满足环境监测时各项严苛要求的封闭装置。

尽管环境传感器件对于消费者来说不算昂贵，但是如果还是只允许学术机构和管理部门把关传感器的部署，那么环境传感器对于消费者成本还是很高。因为传感器的成本其实指总花费，如封闭装置、处理器、通信设备，以及行政管理费和设备维护费。随着新型片上系统（system－on－chip，SOC）的出现，尤其是在机器对机器（machine－to－machine，M2M）的应用中大大降低了成本费，但是在环境监测的传感器中配备这样的新型片上系统可能尚需几年。虽然制备出低成本、灵敏的、稳定的传感器仍是一个挑战，但是智能手机为采集、处理、显示、存储传感数据提供了零成本的平台，大大简化了传感器的制备过程（Crisostomo，2013，Sensorcon，2013）。

11.2.3 技术限制

低成本传感器的功能和敏感特性是有限的。目前环境监测通常监测很多类型的参数：温度，亮度，还有气象站需要的大气压参数。半导体和电化学气体传感器、颗粒物（Particulate Matter，PM）监测传感器虽然成本低，但是敏感特性和精确度通常也比目前使用的检测仪器低（Choi et al.，2009；Romain et al.，2010）。严格的持续校准能够改善传感器的性能，但是传感器依然存在很多有待完善的不足。传感器广泛应用于检测水体中的细菌污染（Grossi et al.，2013），据报道已成功检测水中病原体如大肠杆菌（Mannoor et al.，2010）。然而，相关的传感器在市场上还是很难购买到，将传感器真正用于现场检测细菌污染还需很长的时间。

11.2.4 安全问题

在公共场所设置传感器还需要考虑一些安全问题。政府官员如果获得威胁公众健康的相关数据，将会立刻采取预防或补救措施，这对公众的健康和财产都是很重要的，因此数据来源非常关键。准确的安全警报需要具有强大计算能力的器件来精确地检测环境，这通过耗能型的传感器很难实现。虽然人们不断改善传感器性能，但是传感器计算能力低，很难实现可拓展的、稳定的、精确的监测环境，以保障人们安全。而集成了软件和硬件安全功能的低成本的M2M SOC可以在将来带来一些改善。

11.2.5 可用性和可拓展性

如果购买现成的传感器，其可用性及支持的软件还有不足。大多数的用户会希望能够在户外使用传感器，因此数字无线传感器需要更加容易安装、维护和使用。理想情况下，传感器能够即插即用，并且能连接到聚合器件如智能手机，智能手机

支持使用简单的应用程序，然后通过连接云端服务器来共享、聚合、分析数据。

无线传感器网络（WSN）能够拓展为包含上千个节点的网络，将其用于环境监测时，覆盖面积大且使用寿命长。目前 WSN 已经用于环境监测，但是仅限于几十到几百个少量节点（节点用于描述传感器网络中单个传感器，其能够与网络中其他传感器相连并交换数据信息）。文献中介绍的利用 WSN 实现环境监测的理论还有待实践。

11.2.6　兼容性

不同生产商的传感器间的兼容性对生产商来说是很棘手的问题。市面上的传感器基于标准化或其他特定的协议通信，即使全部使用标准的无线通信，来自不同生产商的传感器设置的用户自定义数据载荷也不同。只有当不同生产商的传感器能相互通信，才能真正实现传感器网络的无线通信，这对生产商来说是一个长期的挑战。

11.2.7　数据质量和所有权

随着传感器的普及，需要设定相关的管理和调配制度，同时增加的数据量也引起了关注，主要需要解决的问题包括：

- 数据归谁所有？
- 数据该如何解读？
- 我们该如何保证数据质量？
- 众包数据是否有显著的统计规律？

以上问题势必引起关心环境问题的市民与投资商之间的争论，争论会以商业、公众、政府、环境性质的活动形式出现，争论内容主要针对数据的有效性和提高公众健康所需要采取的措施。

11.3　环境监测参数

环境监测需要能够鉴定和测量环境中的污染物，并确定环境污染程度不影响公众健康的时刻。环境监测不仅包括空气或水的化学特性、物理特性、放射性和生物特性，还需对特定位点进行监测，建立规范的安全范围，识别超出安全限的检测结果。目前，环境监测除了针对环境污染外，还包括噪声污染、太阳的辐射和周围的城镇状态。

11.3.1　空气质量和大气条件

如今，总是频繁出现与空气质量相关的媒体报道，如燃烧化石燃料、全球城市化、汽车使用量增加、严重的农业和工业污染等话题。世界各地的人类行为均会影

响空气质量，其中最可见的现象是光化学烟雾，光化学烟雾中含有一氧化氮、二氧化氮、可挥发性有机物、臭氧和乙醛等污染物质。全球很多地方存在雾霾现象，如洛杉矶、墨西哥。图 11-2 显示了 2003 ~ 2010 年，部分城市的年均 PM_{10}（小于或等于 10μm 的颗粒物），由图可知，全球很多地方空气中的多种污染物包括大气颗粒物都超过安全范围。

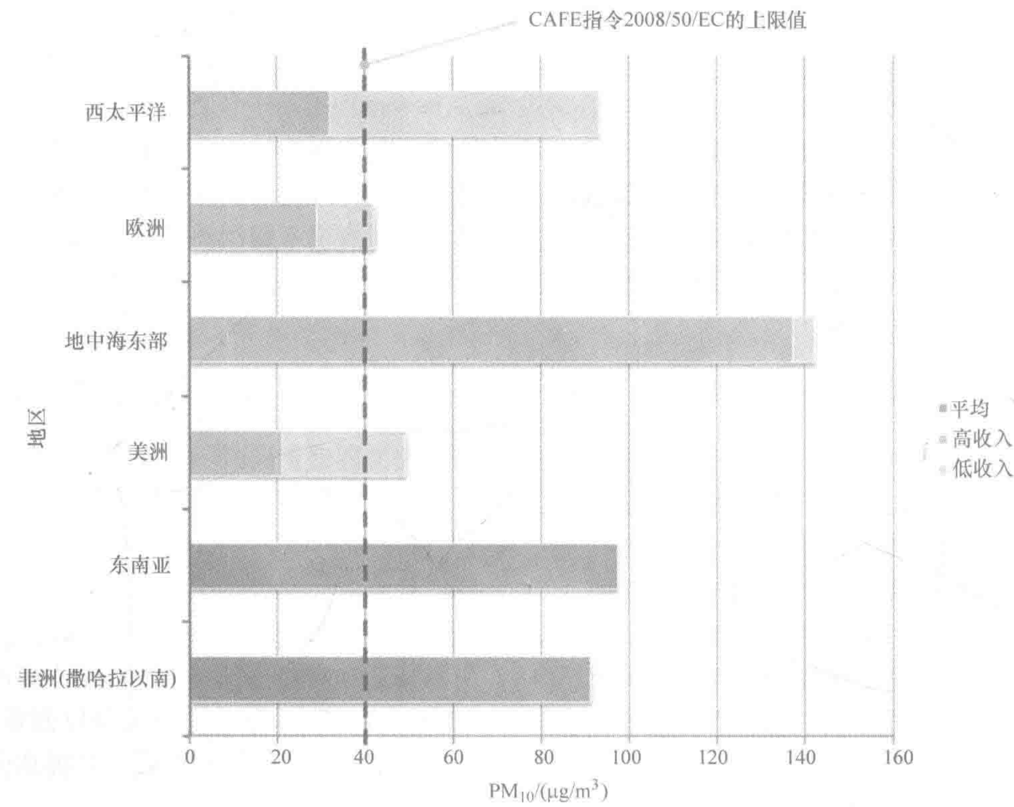


图 11-2　2003 ~ 2010 年部分城市年均 PM_{10}（数据来源：WHO）

空气质量和空气成分均由国际标准定义，如美国的洁净空气法案，欧盟的环境空气法案，如 CAFE 指令（2008/50/EC），详见第 7 章。法案规定了空气质量好坏的范围，以及国家机构如何评估空气质量的方法。

空气质量评估的方法取决于评估的对象。例如，臭氧是通过紫外吸收法测定，无机物质如二氧化硫通过荧光光谱计检测（Queensland Government，2011）。美国设有固定的空气质量监测站，站内自配移动式检测中心（Trace Atmospheric Gas Analyzers，TAGA）。TAGA 可在特殊事件期间或之后监测空气质量或其他指标，例如在墨西哥漏油事件中确定对人体有害的物质。从空气质量的角度，EPA 主要检测空气中有机挥发性化合物（Volatile Organic Chemical，VOC）的浓度，VOC 一般来自溢油或者提炼油过程中使用的化学物质（EPA，2010）。所有用来检测空气质量的仪器都需满足标准要求，如欧洲为 PM_{10} 采样仪器特别制定的标准 EN12341

（Standards，1998），美国国家洁净空气质量标准（National Ambient Air – Quality Standard，NAAQS）制定的标准FR66964（EPA，2008）。除此之外，仪器的刻度、采样方法等都需严格满足相应的标准。这些标准使得空气监测仪变得专业化、固定化、价格昂贵（几千至几万美元）、适用范围小，因此迫切需要使用低成本的、数字的、无线的传感器网络来监测空气的质量。

监测空气质量意味着在不同时间段以不同的标准来监测各种参数，这些参数对大众来说是没有任何含义的。为了解决这个问题，政府通常使用空气质量健康指数（Air – Quality Index for Health，AQIH）。这个数字虽然蕴含了复杂的空气质量信息，但是能简单地提示公众当前的空气污染程度以及对人体健康的影响，该指数对敏感群体尤为重要，例如气喘患者。在芬兰，这项指数为10以内的数（EPA，2013）：好（1～3）、一般（4～6）、差（7～9）、非常差（10）。

这项指数基于5个参数：1h以内的二氧化硫、二氧化氮、臭氧均值，24h内PM_{10}、$PM_{2.5}$（直径小于2.5μm的颗粒）均值，AQIH值取这5个参数中的最大值。美国空气质量指数（Air – Quality Index，AQI）由EPA制定，由6类与人类健康相关的参数组成，见表11-2。指数超过300视为非常差的空气质量，低于50则视为良好（EPA，2013）。

表11-2　基于清洁空气法案规定的五种污染物的EPA空气质量指数

（包括地表臭氧、颗粒物、一氧化碳、二氧化硫、二氧化氮）

空气质量指数（AQI）	健康水平	定　义
0～50	好	满意的空气质量
51～100	一般	可接受的空气质量，部分污染物含量对极少部分敏感群体有害
101～150	不利于敏感群体	敏感群体受影响，但可能对普通公众无影响
151～200	不健康	大多数人健康可能受影响
201～300	非常不健康	紧急事件
301～500	危险的	严重危害人们健康

注：数据来源于美国EPA。

除了用传感器和分析仪器测量空气质量外，卫星监测也已经投入使用多年。卫星监测最大的优势在于大的监测范围，有利于识别和跟踪污染源。目前已有一些成功测量污染物的实例。如2006年发射的MetOp – A卫星，装有欧洲生产的全球臭氧浓度测量设备GOME – 2。GOME – 2集成一个扫描光谱仪，来捕捉地球表面和大气反射的光。光谱仪分析光谱分布得到空气中各物质的含量，如臭氧、二氧化氮、二氧化硫等气体，以及紫外辐射，如图11-3所示。GOME – 2可以分析出空气中各成分含量以及污染程度（WDC – RSAT，2103）。科学家们逐渐热衷于结合卫星和地面检测手段来监测$PM_{2.5}$，因此科学界呼吁研究空气质量和空间的科学家相互合作，来检测$PM_{2.5}$或其他污染物（Hidy et al.，2009）。

卫星监测也是监测全球温度的重要手段。温度测量主要通过间接测量法实现，

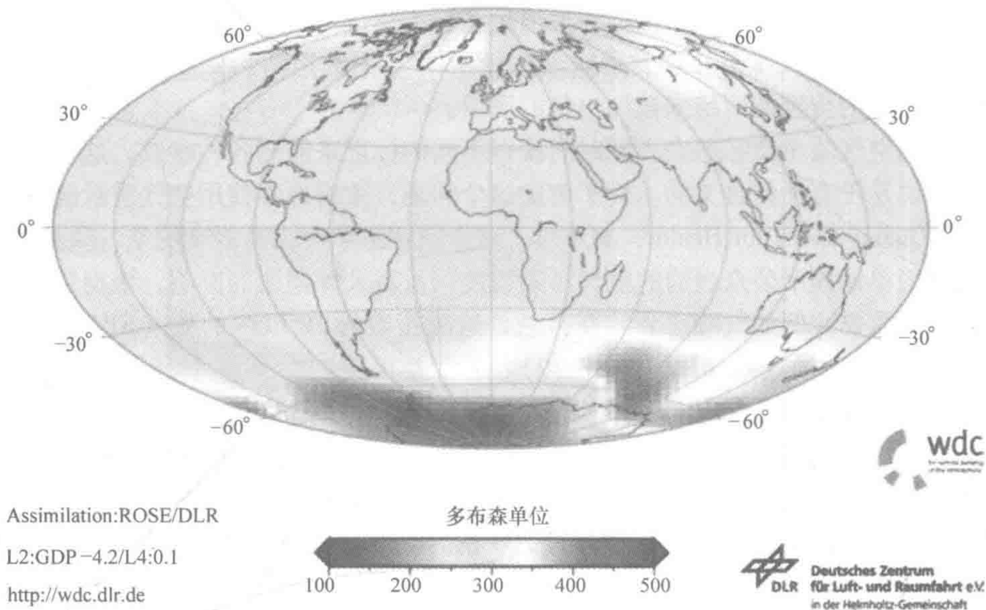


图 11-3　GOME-2 测量的全球臭氧含量（图片来源：国际大气遥感检测数据中心）

即测量不同波段内辐射（辐射指物质表面特定方向给定角度上透过或发射的能量），然后计算出温度值。由辐射值得到温度的方法很多，不同方法的计算结果存在一定的差异，因为计算出的温度值对建立全球温度模型非常重要，因此计算方法上存在争议。目前主要由遥感系统（Remote Sensing System，RSS）和亚拉巴马大学亨茨维尔分校完成计算工作（MedLibrary. org，2013）。

1. 检测空气质量

目前，由于低成本的传感器得到普遍应用，人们可在网上获取空气质量数据。数据集有利于地方政府调整政策，发挥地方自主性，同时也可帮助哮喘患者应对哮喘疾病。然而，数据质量局限了数据集的使用。尤其是基于半导体的低成本传感器，没有达到灵敏度要求，没有校准则存在漂移，周围环境如温度也会影响传感器性能。因此，特定的使用场合，需选择灵敏度和线性范围适合的传感器。为尽可能减少其他因素对传感器性能的影响，需谨慎选择使用方式、包装、采样方式等。

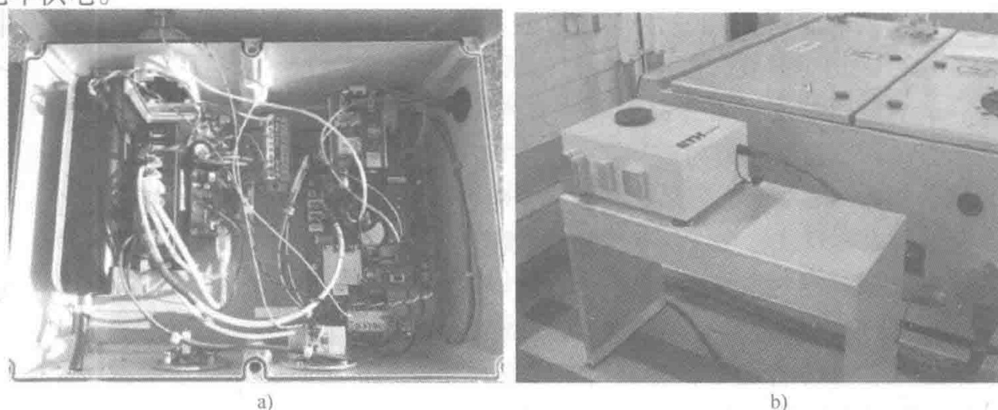
近年来，不少文章指出各种监测空气质量和天气情况的无线传感器已经投入使用，尤其在城镇地区。中国台湾地区部署了监测汽车排放的一氧化碳含量的传感器，监测系统由传感器、开关和后端 LabVIEW 编写的控制程序组成，控制程序实现了将数据存储在数据库中。传感器网络共包含 9 个传感器，相互通过全球移动通信系统（Global System for Mobile Communication，GSM）协议通信。监测结果表明，上午和下午 7 点一氧化碳含量达到峰值，分别对应了上下班高峰期；摩托车等红灯

时持续排放大量的污染物。一些传感器还检测到某些时刻一氧化碳浓度高于 9ppm，而人们长期所处的环境中的一氧化碳不可超过该值（Jen - Hao et al.，2011）。

另外，哈佛大学及其周边部署了 CitySense 平台来监测部分空气质量参数，如 PM_{10}、二氧化碳、一氧化氮、臭氧，以及天气和周围的噪声污染，检测到的数据通过微软的 SensorMap 实现可视化显示（Murtyet al.，2008）。纽约市也安装了类似的传感器，来检测湿度、温度、气压、光亮度，并利用地理信息系统（Geographic Information System，GIS）来获取传感器的地理位置信息，显示时可在传感器部署的位置处显示位置名称、坐标，以及当前位置处的检测结果（Morreale et al.，2010）。

无线传感器相对于普通传感器，最大的优势在于其可以移动应用，而不是固定在特定的位置。如南非的开普敦已引入了该项技术。市民在汽车上安装 Waspmotes（一款集成了检测环境、农业、交通、辐射的传感器的无线传感器平台）和气体传感器（西班牙 Libelium 公司），然后按照规定的路线行驶，从而检测整个城市的污染程度。汽车集成传感技术和云连接技术实现了实时移动监测空气质量，这正是移动式传感发展的第一步。

苏黎世联邦理工学院的研究员们也通过公共电车实现了移动式传感概念。这款空气质量检测产品 OpenSense 能够检测 4 种主要的污染物：臭氧、一氧化碳、二氧化氮和颗粒物（Li et al.，2012）。如图 11-4a 所示，所有的传感器都安放在一个独立的检测站中，这个原型检测站的核心是 Gumstix 嵌入式计算机，计算机支持 Linux 系统，数据传输支持通用无线分组业务/通用移动通信系统（General Packet Radio Service/Universal Mobile Telecommunications System，GPRS/UMTS）和无线局域网（Wireless Local Area Network，WLAN）。GPS 接收机能够获得工作站的地理位置。工作站装有加速度计，如果工作站要放在电车上，还需获取电车门释放信号来判断电车是否停止，这样可减小位置信息误判的概率。如图 11-4b 所示，工作站由电车供电。



a) b)

图 11-4

a）苏黎世联邦理工学院 OpenSense 传感器工作站示意图 b）在 VBZ 电车顶部安装有 OpenSense 检测站示意图

（图片来源：苏黎世联邦理工学院计算机工程与网络实验室 TIK）

目前苏黎世已使用5台上述工作站，其中1台部署在国家空气质量监测网络（National Air Pollution Monitoring Network，NABEL）杜本多夫站内。苏黎世联邦理工学院的传感器性能能够与瑞士材料实验所的定点环境监测站进行比较。后者得到的参考数据用来校准移动式传感设备并评估其在不同天气环境下的性能。相关数据是公开的，获取网址为 http：//data. opensense. ethz. ch，也可用来分析传感器测得的各种参数在一年内的变化情况。图 11-5 对比了春天和冬天的超细微颗粒物浓度（Hasenfratz et al.，2012，Keller et al.，2012）。

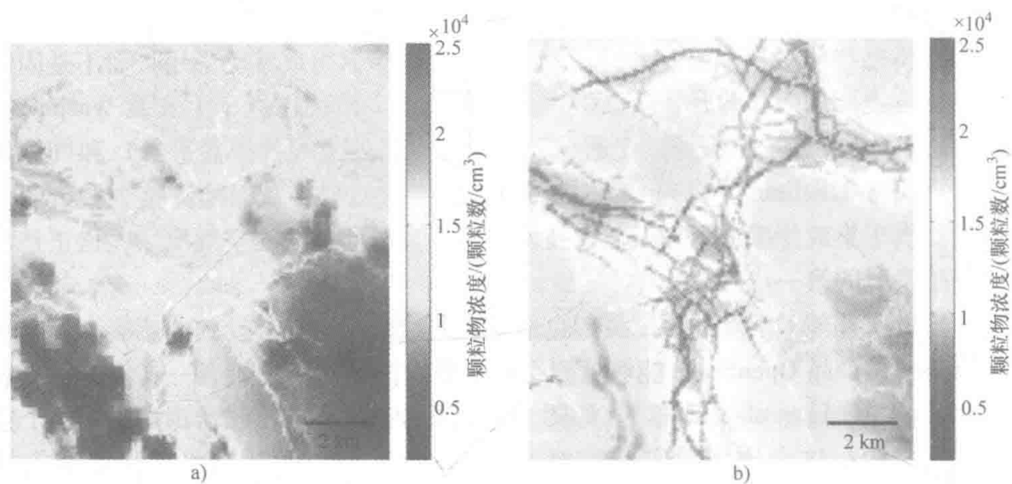


图 11-5　苏黎世市内超细微颗粒物的浓度

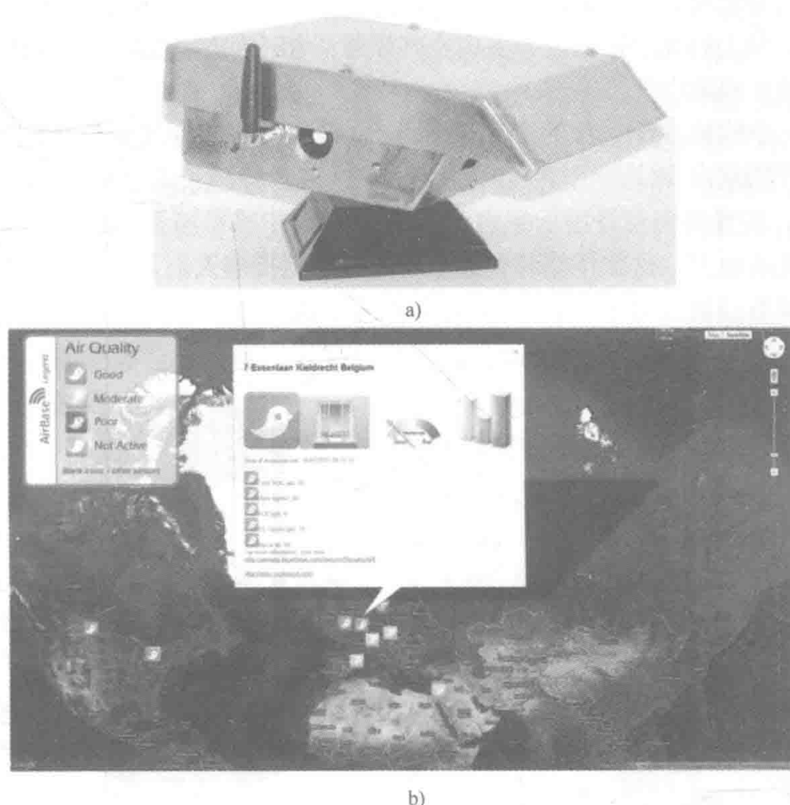
a）春天　b）冬天

注：图片来源于苏黎世联邦理工学院计算机工程与网络实验室 TIK。

市场上，以色列人创办的 AirBase System 公司已经研发出了一款低成本、易使用的监测室内和室外空气质量的传感器，如图 11-6a 所示。这套系统能够检测臭氧、二氧化氮、总有机挥发性化合物、总悬浮颗粒物（Total Suspended Particle，TSP）、噪声、相对湿度、温度，并可以额外安装监测气味、光线、二氧化硫的传感器。单个传感器均需要外部供电，支持 Wi－Fi 和 GSM 通信。一旦传感器充满电，能够在20s 工作周期内获得数据。如果检测到的结果超过安全限，将产生警报。如图 11-6b 所示，系统采集到的数据将传至谷歌地图，通过深入分析每个工作站的数据后，可以获得全球的空气质量状况。

2. 检测室内空气质量

目前室内空气监测传感器已经实现各种各样的功能。第 9 章介绍了传感器用于健康保健，第 10 章介绍了传感器用于安保。如今越来越多的人希望能够监测家中的环境，根据检测结果来提高房间舒适度和健康程度，其中主要关注的是室内的空气质量，空气质量有时会对人们的身体健康带来负面影响，例如引起过敏、哮喘和在室内使用炉子燃烧固态燃料引起身体不适。差的空气质量会引起不良反应，如感



a)

b)

图 11-6

a）AirBase 公司生产的室外空气质量检测仪 CanarIT（图片来源：AirBase Ltd）

b）CanarIT 实时监测到的全球范围内的数据（图片来源：AirBase Ltd）

冒、流感，由过敏引起的晕眩、头痛、呼吸困难、眼睛不适和肌肉疼痛。室内空气污染源主要包括地毯、黏合剂、家具和霉菌。

室内空气监测的方法主要是利用小器皿采集空气样本后，送往实验室鉴定，例如分析是否存在 VOC。其中采样用的器皿可能很昂贵且在检测空气质量过程中使用时间很短。现在有很多传感器能够与智能手机连接，如 Esensors 公司的AQM－p，其使用对象为普通公众，能持续检测室内或附近的空气质量。Kickstarter 项目支持研发的传感器 Air Quality Egg（airqualityegg. com）也引起了人们的关注，传感器放在室外监测周边气体浓度，采集的数据包括二氧化氮浓度、一氧化碳浓度、温度和湿度，并通过无线传输至蛋状的基站。基站通过以太网连接至室内的宽带路由器，将数据传至 Xively 网站显示和存储。

另外一个引人注目的传感器平台 AirBoxLab（www. airboxlab. com）正在进行 beta 测试，能够检测有机挥发性化合物、二氧化碳、一氧化碳、颗粒物、温度和相对湿度。采集到的数据能够传至任意计算装置，包括智能手机，进行数据存取、云

端存储和附加处理。AirBoxLab 正在改善分析功能，包括模式识别和机器学习算法，来智能化指导人们采取措施改善室内空气质量。相应的措施包括打开门窗更新室内空气，找到并根除空气污染源。

另外一个媒体广泛关注的产品是 Netatmo 公司的带有空气质量传感器的个人气象站，能检测室内和室外的空气质量、天气、声音舒适度和其他环境参数。如图 11-7 所示，装置利用铝将用于室内和室外检测的传感器隔开，外观精美，能放置在日常可见的地方。这款传感装置最主要的目的是提醒人们及时通风，从而改善人们的健康状态（通过 iOS 和 Android 应用程序实现）。



图 11-7　Netatmo 公司生产的带有空气质量传感装置的个人气象站
（图片来源：Netatmo，www. netatmo. com）

产品 CubeSensors 同样也可以通过提高室内空气质量改善人体健康状态。该无线传感器体积非常小（50mm × 50mm × 50mm），能够持续测量房间内的温度、湿度、噪声、光线、空气质量和大气压，并通过计算装置将数据传至云端，然后云端将反馈信息传回用户，例如通知用户何时需要调整通风设备，以增大或减小室内湿度等。2013 年夏，该产品一经上市立刻销售一空。

随着技术的发展，人们研制出了很多种传感器件，多数基于 Arduino 平台。Arduino 器件上嵌有一个 Sharp 的光学灰尘传感器，灰尘传感器能够检测样本中的颗粒物，通过以太网连接至 Arduino 外层，然后数据可传至 Xively 存储和可视化显示。一旦传感器更新空气质量的数据，用户会在 Facebook 和 Twitter 上收到更新消息（Nafis，2012）。

科研人员一直致力于改进和评估室内环境传感装置。利用智能手机对传感器采集的数据进行聚合、处理、传至云端存储或处理已经成为传感器发展的趋势。例

如，美国科罗拉多大学博尔德分校研发的 MAQS/M - Pod 系统，产品可穿戴在手臂上端或者背上，检测的参数符合空气质量检测标准。这款产品的创新点在于利用一个风扇让空气穿过传感器，确保传感器在塑料保护外壳内也能有效地接触周围空气。传感器采集到的数据通过蓝牙传至智能手机。整套传感系统可以利用智能手机内的加速度计判断用户是否进入或离开房间，当检测到用户进入房间时，系统触发房间内的定位功能，该功能通过 Wi - Fi RSSI（接收信号强度指标）实现（Jiang et al.，2011）。

美国卡耐基梅隆大学研发的 BodyTrack 项目基于智能手机，能够同时监测室内空气质量和人体生理参数，如心电图、呼吸以及包括光和声音强度的周围环境参数。多参数传感器检测的原理在于同时利用独立的传感器检测相应的环境/生理参数。该产品可以分析空气质量与哮喘或睡眠呼吸问题之间的因果联系，相关数据在网上是公开的，用户可以聚合、可视化显示数据，以及分析数据间的关系等（Wright et al.，2012）。

3. 基于社区的室外空气质量监测

如果想要获取大范围内准确详细的空气质量数据，最理想的方案则是大范围使用相应的传感器。实际上这是不可行的，而是要将传感器布置在合理的位置上，然后利用所有聚合后的数据得到有用的信息。规范化地采集和分析大范围内监测到的空气质量数据并生成详细的报告需要几年时间，这样无法帮助人们分析周围工厂排放废气带来的环境问题，因此，室外空气质量监测设备的研究引起了大家的关注。最好的解决方案就是利用独立的移动式传感器或无线传感器网络中的固定式传感器将采集到的环境数据上传至网络共享。传感器通过配备智能手机实现数据聚合、处理和共享，还可利用手机的 GPS 标出每个采集数据的传感器的地理位置。但是，存在的问题在于不同传感器采集的数据质量是不同的，数据质量通常受传感器有限的校准功能、老化问题、拙劣的采样技术等影响。随着上述解决方案的推广，尤其是当传感器采集的数据具有决策作用时，迫切需要解决传感器的校准和数据稳定性的问题。

卡耐基梅隆大学和英特尔实验室联合开展了 Common Sense 项目，在旧金山的一条街道上布满了传感器（Aoki et al.，2008），来测量一氧化碳、氮氧化物（如一氧化氮和二氧化氮）、臭氧、温度、相对湿度、运动参数（3D 加速度计实现），数据通过蓝牙传至一部移动电话，位置信息则通过手机的 GPS 功能获取。手机中的数据可通过 GSM 短消息传至数据库服务器。旧金山湾区空气质量委员会的初步试验结果表明市内存在微气候现象（不同区域的一氧化碳和二氧化氮含量不同）。来自卡耐基梅隆大学的研究员 Eric Paulos 指出，在全市范围内使用检测站的项目将花费上百万美元，而且还不能得到从市民手机上获得的更详细的环境数据，而嵌有传感器的手机只需花费 60 美元（Westly，2009）。

美国圣地亚哥大学的研究人员开展了 CitiSense 项目，他们召集了 30 个用户进

行试验，每个实验者持有嵌有传感器装置 ATMEGA 128 的智能手机。传感器装置能检测温度、湿度、大气压、一氧化碳、二氧化氮和臭氧，检测数据最后通过 EPA 规定的颜色编码方式为用户显示空气质量情况，结果详见表 11-2。研究人员根据实验数据确定一天内主街道、路口或其他污染严重的地方的位置和污染情况。实验者完成个人的路线后，网上会绘制出反映自己所经路线污染情况的地图，根据地图，人们可以避免污染严重的地方。例如长期去学校的人可以稍微调整路线，回避污染严重的繁忙街道，每天乘坐公共汽车工作的人可以避开在汽车排放尾气的地方等车（Zappi et al.，2012）。

丹麦哥本哈根大学的 Wheel Project 项目用混合式电动自行车替换普通自行车，电动自行车可作为移动式传感单元。传感器安装在后轮的轮芯处，在自行车行驶的时候可测量周围的一氧化碳、氮氧化物、噪声、温度、相对湿度。用户将智能手机放置在车把手上，手机通过蓝牙接收传感器采集的数据，进行处理后显示空气质量结果，从而帮助用户调整行驶路线。用户可以将行驶过程中采集的数据上传至网上，然后以地图的形式显示行驶过程中所经之处的污染情况（Wheel，2013）。据报道能够监测市内空气质量的产品还包括 P – Sense（Mendez et al.，2011）和资源公开的 Citizen Sensor 项目（Saavedra，2013）。

在很多人致力于研究联合使用空气质量监测传感器和智能手机的同时，南加州大学的研究人员开发了一款 Android 应用程序，用户可利用手机摄像头查看空气悬浮颗粒物的情况。手机拍摄的图片配上拍摄位置、方向和时间信息后，打包发送至远端服务器，比较拍摄图片和已存模型中天空的亮度，然后进行校准，一旦处理过程完成，用户会收到实际的空气质量结果。同样，采集的数据会用来绘制成地图，反映各地的污染情况（Ganapati，2010）。

市场上可购买的产品如 SensPods 聚合了很多传感器采集的环境数据（Sensaris，2013），数据通过无线方式共享。传感器测量的参数包括湿度、二氧化碳、温度、一氧化碳、放射性、噪声、氮氧化物、亮度（长波紫外线（UVA），中波紫外线（UVB），短波紫外线（UVC））、GPS、臭氧、$PM_{2.5}$和PM_{10}，数据可通过蓝牙传至任意支持 Android 或 iOS 系统的智能手机。同样，数据可传至 Sensaris Sensdot 网站，分析后得到用户规定时间内各种可视化的图表结果。如图 11-8 所示，数据也会绘制成地图，反映人们生活或工作区域内各处的污染情况。

11.3.2 环境天气

虽然监测周边环境主要针对空气质量，但是越来越多的人也利用传感器分析室外天气对人类健康的影响。随着城市化加剧，建筑环境（尤其是像热浪这样的天气事件中）通过热应力会对人体健康产生巨大影响。基于卫星监测和 GPS 定位技术的监测结果表明，大城市里总是出现热岛效应现象，即市内温度可达到比周围乡村高 1 ~ 10℃。前几代人造卫星能观察到的粒度尺寸有限，然而最近几代人造卫星

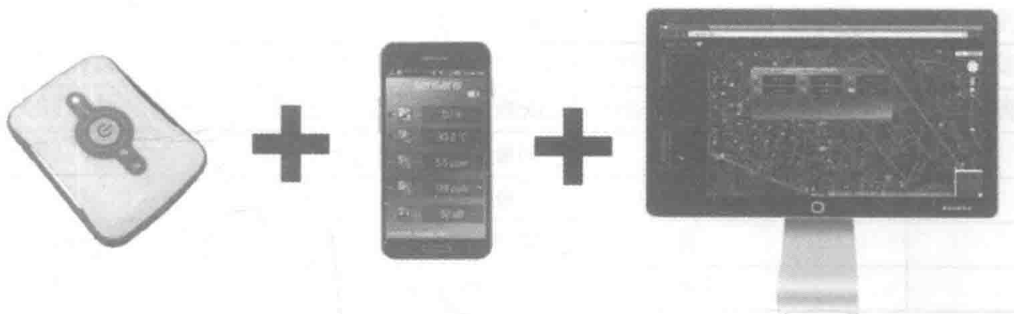


图 11-8　Sensaris 公司生产的移动监测周边环境的 Sensaris Sensdot 系统
（图片来源：Sensaris 公司，网址：www. sensaris. com）

都提高了空间分辨率，并且固定式或移动式传感器可采集周边环境内高分辨率的数据。地面上的传感器提供的环境细节正弥补了人造卫星观察城市环境时的不足。监测周边环境的城市传感平台一般在自主性城市内试运行，已多次进行监测全市范围内环境的实验，如桑坦德（SmartSantander，2013）、巴萨罗那（BarcelonaSmartCity，2013）和阿姆斯特丹（Amsterdamsmartcity，2013）。实验旨在监测气象状态并分析其对市民健康的影响。城市管理者或规划者可利用传感装置采集到的数据采取补救措施，如植树和建立公园等。

室外环境的气候变化多端，并且个人衣物、周围环境、微气候的物理和生物特性均因人而异，因此量化气候对人体舒适度和健康状态的影响是十分困难的（Honjo，2009）。不过已有少量指标用来量化上述影响因素，目前使用最广泛的指标有：标准有效温度（Standard Effective Temperature，SET）、预测均值舒适性指标（Predicted Mean Vote，PMV）、生理等效温度（Physical Equivalent Temperature，PET）。SET 代表"标准"状态下的个体在"标准"环境下的热量值。PMV 指特定环境下大量人群温度值的均值预测，见表 11-3，PMV 值是根据热量转移特性得到的经验值，即当人体和环境间热量交换达到稳定状态时，人在最佳舒适度时的热量值。PET 则是基于热量平衡的热生理模型（称为慕尼黑人体热量平衡模型（Munich Energy - Balance Model for Individual，MEMI）），并考虑所有调节温度的因素后得到的数值。

表 11-3　不同的热感知和生理应力下的 PMV 和 PET 值

PMV	PET/℃	热感知	应力级
-3.5	4	非常冷	非常强的冷应激
-2.5	8	冷	强的冷应激
-1.5	13	冷	一般的冷应激
-0.5	18		
0.5	23	微冷	轻微冷应激

（续）

PMV	PET/℃	热感知	应力级
1.5	29	舒适	无热应激
2.5	35	微暖	轻微热应激
3.5	41	暖和	一般热应激
		热	强的热应激
		非常热	非常强的热应激

从感知的角度考虑，人们更加关心的参数是气温、辐射温度、气流速率和相对湿度。据报道已有很多城市部署了相关传感器，如中国香港（Cheng et al.，2012）、斯里兰卡的科伦坡（Johansson et al.，2006）和格拉斯哥（Krüger et al.，2013）。研究表明利用传感器检测气候有利于分析和量化周围环境，如风速和太阳辐射对人的热舒适度以及人体气象学的影响，人体气象学主要研究人体与气候间的反应和相互间的联系（Höppe，1997）。其他传感器的应用实例表明绿色植被有利于改善周边环境、人体舒适度和空气质量，如杭州（Shuo et al.，2010）、纽约（Gaffin et al.，2009）和特拉维夫（Cohen et al.，2010）都有相关报道。虽然智能手机已有各种各样的天气应用程序，还是需要开发以用户为中心的天气监测功能。Kickstarter 公司赞助的 Sensodrone 项目开发了一款传感器集成装置，装置体积小能够固定在钥匙环上，钥匙环通过蓝牙将传感器数据传输给智能手机。该装置具有多功能用途，例如作为一个移动式气象站，可检测的参数有湿度、温度、光亮度、臭氧和一氧化碳，手机上可下载的应用软件很多，例如监测相对湿度、计算空气质量指数的软件。空气质量指数包括一氧化碳含量、二氧化碳含量、温度、湿度和气压值（Gaffin et al.，2009）。

11.3.3 UVA/UVB 检测

已知紫外线辐射与癌症之间存在关联。臭氧层空洞、污染（Gillette，2011）和一些不良的人类行为导致人们接收大量的紫外线辐射，这已经成为全球范围内的问题。太阳光照射不足会影响维生素 D 的吸收，从而引发相关的身体问题。体内维生素 D 的量主要取决于太阳光照射和食物摄入，对大多人来说，适当的晒太阳才能保证充足的维生素 D 的吸收（Holick et al.，2011）。在北方，维生素 D 缺乏引起医学上广泛关注，因为维生素 D 缺乏会导致儿童患佝偻病，老年人患骨质疏松症，同样可能增加患常见癌症、免疫性疾病和高血压的风险。

紫外线根据波长分为 3 个波段：

- UV－A（波长范围为 315～400nm）。
- UV－B（波长范围为 280～315nm）。
- UV－C（波长范围为 200～280nm）。

UV - C 通常被臭氧层吸收并不能到达地球表面。但在部分出现臭氧层空洞的南半球地区，过量 UV - C 已经成为一个重要的环境问题。图 11-9 绘制了引起红斑症状的紫外线波长与光照度曲线，可用来确定多强的紫外线照射会导致晒伤等伤害皮肤的问题。

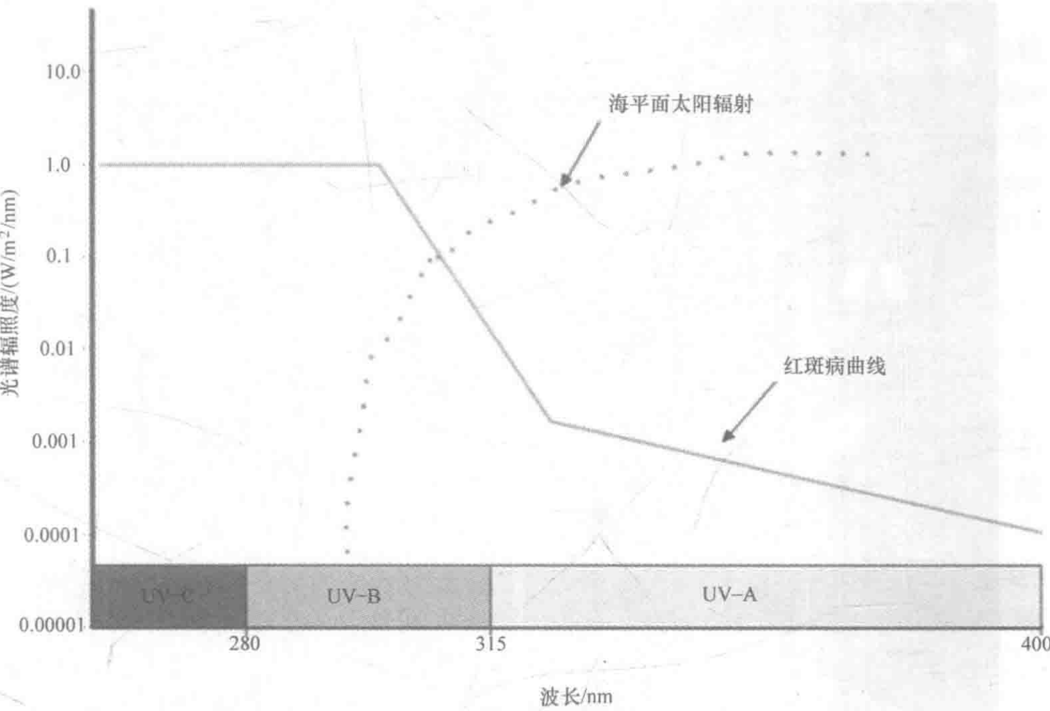


图 11-9　红斑病的致病曲线图

紫外线可通过多种方式测量，例如辐射计、个人放射量测定器、人造卫星，如 GOME - 2。个人放射量测定器内置的传感器主要测量 UV - A/B。通过化学法测量放射量的装置可以粘到暴露的皮肤（SunSignal，2013）或者袖口上（UVSunSense，2013），其销售对象主要是家长，他们希望能够检测孩子接收到的紫外线辐射量。生物法通过测定微生物如枯草杆菌（Biosense，2013）的突变系数来测量紫外线辐射量，虽然这种方法的检测结果很好，但是使用起来不方便，而且分析过程耗时较长。最常见的 UV - A/B 测量方式是电子放射测定器，产品样式丰富，例如 FP7 ICEPURE 项目研发的穿戴式手表，如 Sunsaver（ICEPURE，2009）。

例如 EPA UV Index、My UV Check、Sun Safe 等检测紫外线的手机应用程序已经很多。应用程序利用的数据一般来自当地气象站。日本利用 DoCoMo 传感器已实现将智能手机转换为紫外线测量器（Lamkin，2011）。Sundroid 产品基于外穿式紫外光敏二极管传感器，通过蓝牙将数据传至 Android 手机。如图 11-10 所示，手机上应用程序显示累计的紫外线辐射量，当前紫外线指数，以及紫外线暴露的时间

轴。如果可以采集到更加复杂的辐射信息，手机上能显示更加详细的紫外线辐射量。这款产品已经应用于各种场合，如滑雪和登山（Fahrni et al.，2011）。麻省理工学院的移动体验实验室同样也研发了类似的产品（Laboratory，2011）。

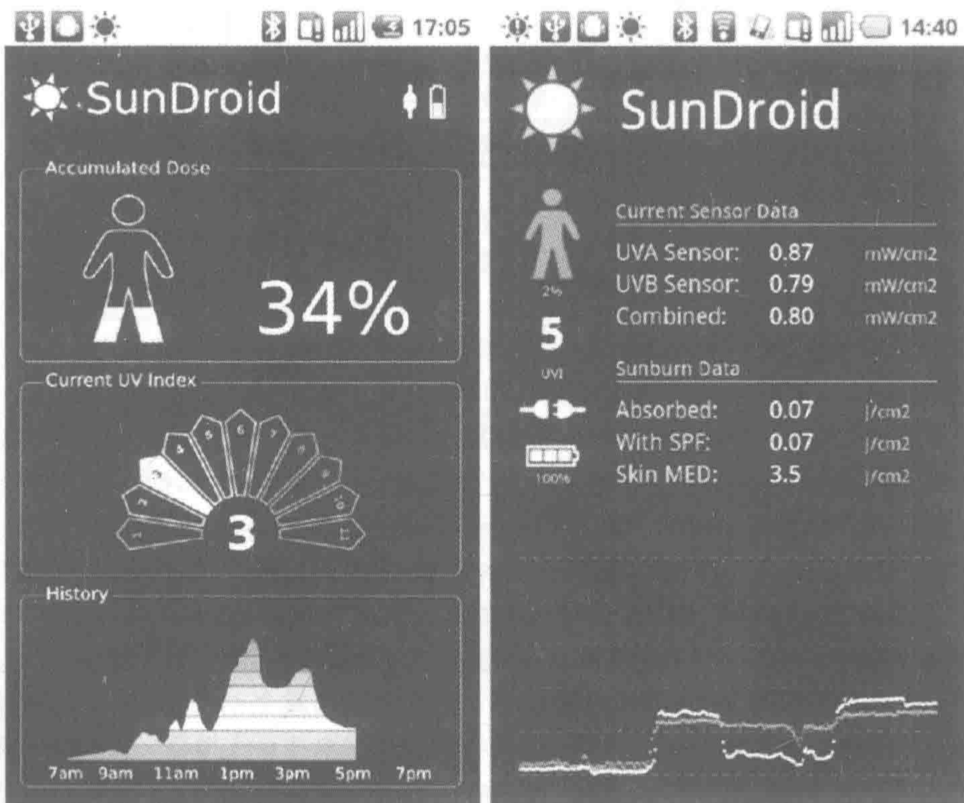


图 11-10 Sundriod 产品界面：常规视图（左）和对应的放大视图（右）
（图片来源：苏黎世联邦理工学院的分布式计算团队）

澳大利亚南昆士兰大学研发了监测紫外线的智能手机，其内部不需要专用的紫外线传感器，而是利用手机摄像头采集的图像获取波长低于 340nm 的紫外线辐射量（Igoe et al.，2013）。这是很好的发展趋势，但是在投入使用前，手机摄像头需要改进，最终实现测量波长低于 280nm 的紫外线辐射量。

11.4 水质监测

由于全球范围内对清洁淡水的需求，迫切需要研制出能够精确监测水质的器件。城市化、农业方式精细化、食品加工等都加剧了水的需求量。同时，相关的人类行为也更加严重地污染了水源。然而只有当新的人类行为导致水污染时，水质问题才得到关注，而新的污染源总是会对水质带来巨大的负面潜在威胁。例如，利用

水力压裂法采集页岩天然气引起了国际争议。采集天然气时采用水力压裂法，使得水和化学物质产生强压，然后推动水平钻孔。强烈反对该采集方法的人担心水力压裂法产生的化学物质会污染水源，同时采集过程会在地下水层释放自然气体，如甲烷。因此，需要水质传感器实时获取水质信息来弥补实验室分析方法的不足。最好是将传感器检测的数据透明化，保证公众知道水质检测情况。

各种传感器技术已用于监测水质。手持式传感器可让科学工作者实现现场检测。固定式传感器可嵌入控制系统用于公众水资源监测。无线传感器如 WaterBot 可监测特定水源的质量（Carnegie - Mellon，2013）。除了传感技术以外，还有一些重要的技术可用于水质监测，如电化学（Kimmel et al.，2011）、生物技术（Lagarde et al.，2011）、MEMS（Jang et al.，2011）、微纳技术（Rassaei et al.，2011）和光学技术（Namour et al.，2010）。

过去几年时间内，光学传感器由于比电化学检测更易实现和操作而得到迅速发展。例如，荧光和光吸收法广泛用于光学检测手段中。激光和发光二极管技术的改进也促进了水质监测手段的发展。复杂的分析结果总需要对样本预处理，并采用多种分析法分析样本，因此人们大力发展微流控芯片（Jang et al.，2011）。微流控芯片将实验室内分析技术微型化，集成在一个单晶片上，保证送样的稳定性和有效性，因此操作具有灵活性和便携性。

上述各种类型的检测手段可以为人们提供各种水质参数。参数主要分为 3 类：物理、化学和生物性质。显著影响水质的因素包括悬浮沉积物（浊度）、藻类（叶绿素和类胡萝卜素）、化学物质（化肥、杀虫剂和金属）、溶解的有机物（污水）、释放的热量（食品加工）、水生维管束植物、病原体和油类。虽然传统的实验室分析法能够精确分析上述污染物，但是分析过程耗时，从而得到延时的分析结果。实验室进行水质分析时需定时采样，因此实验结果也受采样间期，以及其他被忽略的随机因素影响。而一些无法检测出来的因素可能会对人体健康带来潜在威胁。因此，实时检测水质成为发展趋势，将其与实验室分析手段结合，可用来保护公众安全。

YSI（www. ysi. com）、Intellitect Water（www. intellitect - water. co. uk）、Liqum Oy（www. liqum. com）和 Optiqua（www. liqum. com）等公司已研制出实时检测水质理化参数的产品。实时检测功能对智能化水质监测系统的发展具有重大影响。整套监测系统中包含传感器、控制系统、水处理系统，最终完成最优化的获取、传送、利用、净化水资源的过程。IBM 公司联合政府机构如加利福尼亚州的 Sonoma 地区水资源管理机构、纽约哈德逊河的 Beacon 研究院来测试上述水质监测设备的第一代产品的性能（IBM，2010，Beacon Institute，2007）。

与提高空气质量类似，纽约的 Don't Flush Me 项目旨在改变市民行为来减少排入哈德逊河的污水量。最初使用的装置使用基于 Arduinio 的近距离传感器和移动电话检测下水沟内的水位。如果污水持续增加会流入哈德逊河，此时会反馈各种可

视化的信息，提醒市民减少污水排放量。可视化反馈信息包括网站上显示的各区域污水量、短消息和联网的指示灯。后续改进的检测装置利用温度和导电性来检测下水道的污水是否排入河中（Percifield，2012）。

Argo 项目在全球范围内使用了超过 3600 个自主研发的漂浮式传感器来检测海水的温度和盐度。每个传感器沉入水下 1000 ~ 2000m（1300 ~ 6500ft）并保留约 10 天。然后传感器会升至水表，收集温度和盐度数据。当传感器上升并保持在海水表面时，其将位置信息和采集到的数据传至人造卫星，然后沉至预设的深度，即完成了一个检测循环并且开始一个新的循环。其他类型的传感器，如 pH 值、含氧量、硝酸盐含量，正处于研发或者测试阶段。Argo 项目的数据是公开的，可供任意领域研究，如气候、天气、海洋学、渔业（Kramer，2013）。

11.4.1 水质物理参数检测传感技术

目前已有少量持续监测水质物理性质的传感器，检测的参数见表 11-4。

表 11-4 物理水质分析传感器检测参数

物理性质	性质描述	传感器
温度	水的温度影响其密度、溶质溶解度、pH 值、电导率、化学反应速率、生物活性	温度传感器
导电性	导电性反应水能传导电流的能力。导电性与溶质的浓度和类型有关，溶质包括金属、无机物、有机物。水中电荷可能引起水导电性的改变。例如污水中的氯离子、磷酸盐、硝酸盐均会增加水的导电性。相反，油滴中的有机物会使水的导电性降低	导电电极
颜色	水中的溶解物和悬浮物会使水呈现出最明显的颜色，而溶液真正的颜色是过滤去掉悬浮物之后的颜色，因此水质对健康的影响完全取决于水中溶解的物质	光学法：比色计
浊度	水中悬浮物质或者杂质造成水浑浊不清，杂质包括土、泥、植物、可溶的有色有机物、藻类和微生物。过于浑浊的饮用水外观不好看，且引起身体不适，如肠胃炎	光学法：浊度计表面散射法

11.4.2 水质化学性质传感技术

检测水质化学参数的传感器能够鉴定溶解或悬浮在水中的有机和无机元素和物质。基于电化学或光学技术的传感器可实时检测水中污染物，如硝酸盐、重金属。人们感兴趣的传感器可检测的参数一般包括 pH 值、硬度、硝酸盐、磷酸盐、溶解氧，见表 11-5。

表 11-5　水质化学性质分析的传感器检测参数

物理性质	性质描述	传感器
溶解氧	质量良好的水中应包含充足的溶解氧，水中溶解氧的变化主要由水中有机废弃物引起。低浓度的溶解氧表明水中存在大量微生物，在分解污水、生活垃圾、农业废料或者植物过程中消耗大量氧气	电化学法：安培法，电化学腐蚀，极谱法 气体光学：荧光法 生物传感器
pH 值	水的 pH 值代表了水中氢离子的浓度。饮用水的 pH 值需保持在 6.5～9.5。过高的 pH 值表明水中存在化学溢出物，问题可能出现在水净化或者供给过程	电测量法：电位计 ISFET 光学法：比色试剂盒
氯离子	由于地下水从石床、沙和碎石间渗出，因此水中溶解了各种矿物质，其中包括氯离子。水井或者水库中的氯离子含量超标，表明水受污水、工业和农业废料等污染	电化学法：安培法 光学法：比色试剂盒
ORP	水的氧化还原电势可用来衡量水的净化处理过程，该指标通常用来监测饮用水、游泳池和浴场。氧化还原电势单位随应用场合变化，一般为 mV。水的氧化还原电势会对水中病原体进行彻底消毒	电化学法：电位计
游离氯	氯气和水反应会产生游离氯。水中的氯分子和氯离子作为氧化剂杀死细菌，保障了饮用水的安全。但是过量的氯会导致膀胱癌和直肠癌	电化学法：极谱法，安培法 光学法：比色试剂盒
重金属	一般的重金属包括镉（Cd）、铜（Cu）、汞（Hg）、铅（Pb），重金属对人体存在危害，例如阻碍生长发育、癌症、器官衰竭、神经系统受损，甚至致死。尤其是小孩易受水中重金属的影响	电化学法：ISE，ISFET 光学法：发光谱，荧光法
磷酸盐	水通常会从河床和矿物中吸收磷酸盐。人类或动物的粪便、洗衣粉和洗涤剂，以及化肥都会导致水中磷酸盐增多。磷酸盐增多会导致水质问题，如水藻过量生长，并危害人类健康，如肾衰竭和骨质疏松	光学法：比色试剂盒 电化学法：电位计 ISE
硝酸盐	硝酸盐是水中含量较高的可溶无机物之一。水中的硝酸盐主要来自污水、化肥和动物粪便。水中的硝酸盐经调查发现在人体中会转化成亚硝酸盐。亚硝酸盐危害人类健康尤其是幼儿，导致婴儿患高特血红蛋白症和蓝婴综合征。硝酸盐还可能会转化成亚硝酸胺，引发癌症	电化学法：电位计 ISE 光学法：紫外线吸收法，荧光法

11.4.3　水质生物病原体传感技术

水质的生物性质主要包括水中病原体，或者其他会影响人体健康的物质。生物污染一般受到严格控制。例如，美国的安全饮用水法（Safe Drinking Water Act，SDWA）和洁净水法（Clean Water Act，CWA）特别关注水中的微生物污染。CWA 的颁布保护了饮用水、水产品用水和娱乐用水免受污染。SDWA 规定了合理调配饮

用水和保护水源的规定（EPA，2012）。

受污染的水中能检测到很多类型的病原体，如大肠杆菌（Escherichia Coli，E. coil）、隐孢子虫、贾第鞭毛虫。目前的检测方式要求将样本提前培养一晚以提高病原体含量，提高检测灵敏度但是耗时长。但是，有时候在检测结果出来以前水就受到污染，这样无法及时通知公众。传感器最吸引人的地方在于能够快速检测水中微生物污染。但是受到技术局限，市场上这类传感器还非常少。利用传感器检测微生物污染将一直是研究热点，尤其利用 DNA 检测某些特定微生物出现时刻的生物传感器具有广泛应用前景。表 11-6 列出监测水中微生物的水质监测传感器的检测对象。

表 11-6　常用的检测水中微生物污染的传感器

生物性质	性质描述	传感器
蓝藻细菌	蓝藻细菌可能会危害人或动物的健康。蓝藻细菌在水中很常见，但是污水、农业化肥、食品加工废水排入水中等类型的污染会导致藻类疯狂生长，从而引起恶心、呕吐、头晕、腹痛和腹泻	光学法：荧光法
叶绿素	浮游植物产生叶绿素。叶绿素本身对人体无害甚至可能有益。但是水中的叶绿素表明水富营养化，而富营养化可能由于农业肥料流入水中，这对人体是有害的	光学法：荧光法
隐孢子虫	隐孢子虫是一种原核寄生虫，通常来自于人或动物的排泄物，会引起腹泻，称为隐孢子虫病。隐孢子虫的卵不能被氯杀死，因此水的净化和过滤过程是消灭隐孢子虫的关键	生物传感器（研发中）
大肠杆菌	如果饮用含有大肠杆菌的水，会引起恶心、呕吐、腹痛、腹泻，甚至致死。水中的大肠杆菌可能来自污水污染	生物传感器（研发中）

11.4.4　移动式水质检测传感技术

正如本书中介绍的其他用途的传感器，水质监测传感器也正发展为移动式的。传统的手持式传感器已长时间用于现场检测，现在智能手机取代了手持式传感器中复杂的数据存储装置。例如，In – Situ 公司（www. in – situ. com）近年来发布了一款手机应用程序 iSitu，手机通过蓝牙连接手持式检测探针，探针上集成了检测水中溶解氧的光学传感器，以及检测气压、气温和水温的传感器。手机的 GPS 功能可定位传感器的地理位置，照相功能可采集图片。采集的数据可以实时传至任意位置，现场操作人员可灵活地将数据传回办公室，然后接受更新数据的指示。另外，Insta – link 公司开发的一款应用程序可扫描带状区域内游离氯含量、pH 值、碱度、硬度、三聚氰酸来评估游泳池或浴场中的水是否符合要求。

人们开始致力于研发监测水质的智能手机。例如 MoboSens 公司正在开发一款基于手机的传感器来精确测量硝酸盐，旨在便于市民通过社交媒体收集和共享水质的检测数据，后台聚合已存的所有传感器数据后提高公众的安全感。公司计划扩展

传感器的功能，同时还能检测砷、重金属离子、细菌和放射性物质（Edgar，2013）。另一款产品是 Sensordrone 公司研制的多参数传感器集成装置。目前 pH 值和溶解氧传感器处于研发过程中，研发完成后将更加完善现有传感装置的功能（Sensorcon，2013）。

传感器与移动设备的结合虽然还处于研究初期，但是完成后将具有强大的检测功能。市民收集和共享的水质数据、地理位置，以及时间信息可绘制成水质信息地图。如果市民担心自己所用水的质量，可以定期检测水质并上传数据，这将帮助市民了解生活用水的质量及其随时间变化的情况。上述方法将等效于健康保健领域中环境的量化过程（详见第 7 章），即可提前判断水质是否存在问题。

11.4.5　环境噪声污染

随着城市化、工业化、航空运输的发展，噪声污染也随之加剧。EPA 如下描述噪声污染："人们日常生活中睡觉或交谈时听到不想听到的、影响生活质量的声音"。研究表明，人体健康与噪声相关联，噪声污染容易导致人们神经紧张、高血压、谈话受干扰、听觉受损、睡眠受扰、工作效率降低。一些个人或公司开始关注相关传感器件，并在智能手机上开发了应用程序 Sound Meter。住宅环境检测装置如 CubeSensors 已集成噪声程度监测功能，这样的方法可以提高数据时空分辨率，但是目前仅限于官方噪声调查使用。噪声调查通常将分散的各地的调查报告整合为较大范围内整个区域的调查结果，这样没有充分考虑空地、建筑类型、绿化带、车流量等因素的影响。

利用众包的方式绘制室内噪声污染图的概念已经推动企业或组织开发了多款检测平台。NoiseTube 项目基于智能手机建立众包，手机上的应用程序收集噪声级、GPS 定位的坐标、时间和用户输入的数据，然后利用自带的实时处理信号的算法计算出环境中声音的响度，通过颜色实时显示当前噪声对健康造成的危险系数，同样用户可以输入噪声来源等备注信息。手机收集到的信息传至网上后最终会在谷歌地图上显示。用户希望通过自己记录的环境日志或电子日志，引起当地政府对噪声污染以及社会危害的注意（Maisonneuve et al.，2009）。类似的基于智能手机的噪声传感装置已经在很多城市推广，如澳大利亚的布里斯班里使用的 Ear - Phone（Rana et al.，2010）和英国剑桥市内推行的 NoiseSPY（Kanjo，2010）。

为了量化人体受噪声污染的影响，人们开发了 SMART - Band 来感应皮肤表面的导电性和温度。检测方法来自将人体作为传感器感知环境的概念，旨在将主观感觉和情绪转化为量化的数值。Kaiserslautern 团队进行了测试环境对情绪影响的实验，共 18 人，实验地点不定，比如有噪声污染较严重的车流量大的地方和市内较安静的公园，每个人佩戴独立的传感器检测噪声级，但是由于传感器是穿戴在身上，所以检测结果通常会受影响（Bergner et al.，2012）。正是由于皮肤阻抗数据不稳定且重复性差，实验结果并不理想。因此产品还有待完善，如去除基线漂移，

保证传感器与人体可靠的接触，最后的情绪检测结果参数更加丰富。尽管存在不足，但是，实验为我们提出了一个设想，将来传感器能够帮助人们测定环境对人体健康的影响。西班牙 Jaume I 大学的研究人员融合了将人体作为传感器和游戏化（利用游戏的方式吸引人们的参与）的概念，在支持 Android 系统的智能手机上研发了一款追踪噪声的游戏 NoiseBattle。参与的人需要在整个城市内移动，采集完整的市内噪声图（Martí et al.，2012）。

11.5 辐射检测

辐射的话题总能引起人们的恐慌。乌克兰的切尔诺贝利和日本的福岛核泄漏事件更加增加了人们对辐射的恐惧。如果受到上述事件内的辐射，对大多数人来说的确值得担心。其实，家里也可能存在辐射威胁，如超标的氡气。土壤中的铀衰减后会产生氡气，室内的氡气可能来自建筑裂缝或通风口等。美国每年死于肺癌的人数达 21000 人，而氡气是除吸烟外最大的致病因素（EPA，2013）。氡气测试的常规方法是在室内定期采样空气，然后装在采样器皿内送往实验室分析。目前市面上可以买到相关传感器产品持续监测氡气，结果发现其含量随时间变化较大。例如 Family Safety Products 公司生产的传感器 Safety Siren Pro3 Radon Gas Detector 可持续监测氡气，并当含量超过安全限时发出警报声音。

2011 年日本福岛核电站出现核泄漏后，当地超过 15 万人疏散至距离核电站 20mile 外的区域。在隔离区附近测试辐射量的人令人担忧，而且由于采集到的数据不可靠及分辨率不够，政府牵头开发 Xively 网络平台，公众可方便地将数据上传共享。但是，当地辐射测量数据代表性不够，因此西班牙 Libelium 公司发起了一个开发无线辐射传感器的国际项目。图 11-11 所示为支持 Arduino 通信的辐射传感器，目前已经投入生产和使用。该产品的硬件设计和源代码均是对外公开的。福岛当地的

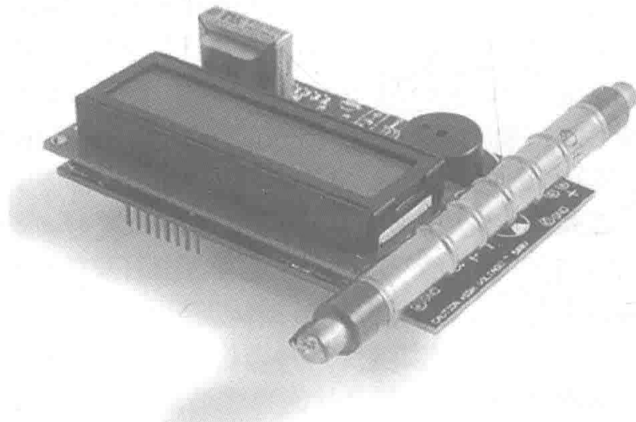


图 11-11　Libelium 公司生产的基于 Arduino 通信的辐射传感器（图片来源：Libelium 公司）

工程师可利用传感器采集辐射数据并对公众公开（Boyd，2011）。正是由于福岛事件的催化作用，政府建成了一个全球传感器网络 Safecast，包含大量移动式、手持式的和固定式的传感器，方便人们收集和共享测量的辐射值，然后授权的人可以查看周围环境的安全性并共享相关信息（Safecast，2013）。

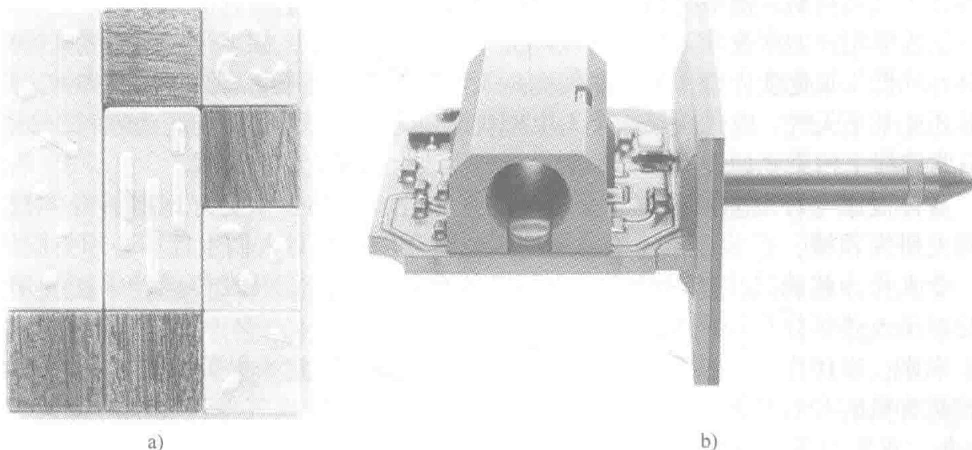
11.6　环境对食品的影响

长期以来，人们希望使用传感技术检测农产品。近年来，市面上已有相关的无线传感器产品。随着人们越来越关注食品安全性问题，农产品监测传感器可能会随之增多。例如，Libelium 公司已经看中这个市场并研发了 Waspmote Agriculture Board，该产品能够监测多项参数，包括空气和土壤的温度和湿度、可见光、风速、风向、降雨量、气压、叶面湿度。

这类传感产品设计用来在种植季节减少人力，即可监测最佳的植物生长参数，如土壤含水量。当传感器检测到的生长参数不是设置的最佳值时，会自动调节灌溉系统。这样让灌溉量保持在最利于植物生长的值，还可以节约用水。传感器在农业、食品生产、食品物流中的应用已经超过本章介绍的范围，因此不再详述。消费者目前刚开始接触这类测量环境对食品质量影响的传感器。

过去几十年内，不恰当的耕作方式，包括过量使用化肥和杀虫剂，其对食品质量和安全性的影响，已经引起了大多数人的争论。因此，很多人开始食用有机食品。人们普遍希望持有检测食品安全性的传感产品。

个人环境监测仪 Lapka，如图 11-12a 所示，产品外观很好看。该产品能够检测放射性、电磁场（Electromagnetic Field，EMF）、湿度和有机物质，并通过无线连接将数据传至 iPhone 手机应用程序。有机物传感器模块用来检测原生态产品中大量的硝酸盐，根据 Lapka 检测结果表明，硝酸盐可能来自人造化肥。如图 11-12b 所示，



a)　　b)

图 11-12

a）Lapka 集成传感器　b）有机物传感器模块（图片来源：Lapka 公司）

产品中的不锈钢探针能够插入水果或蔬菜，以及其他硝酸盐含量不能过高的农产品中。如果待测的农产品的导电性明显超过上限，则认为其种植方式是非有机的。这款产品能够检测的硝酸盐范围为 0 ~ 5000ppm。

上述的检测功能非常吸引关心健康问题的消费者。在不久的将来，市面上会出现各种新型的检测环境对食品质量和安全影响的传感器。但是在此之前还有许多困难需要克服，比如如何识别农作物中无机物质的来源，是来自种植的地质环境，还是人为过量的使用化肥。为此市民可以绘制农场图，上面对食品来源地进行标记，标记信息包含水和土壤的自然条件的优劣级别。农场图可作为传感器检测的食品参数的参考，这样的传感器还处于发展初期，一旦各种各样的传感器在市面上出现，必将引发公众对它们各自优点的讨论，最终会根据传感器是否能正常工作并提供有用的数据来选择。

11.7 环境监测的未来方向

市场上环境监测产品所占经济值以每年 6.5% 的速率增长，预计 2016 年之前能达到 156 亿美元。经济占比的快速增长很大程度与科研机构和管理部门有关，也有少量与消费者有关。传感器以及将其用于量化自己周围的环境的概念会不断发展。传感技术还会被发掘新的用途，并给人们对周边环境及其如何影响我们身体健康带来全新的认识。

市场已经呈现出了环境检测传感产品的第一波热潮。最初销售出去的相关产品，如 CubeSensors（Isakovic，2013）已经反映出了公众对空气质量、噪声污染、食品是否有机等信息的渴望。正如本书讨论的其他用途的传感器，其关键的组成部分都包括移动式平台，即可通过用户应用程序存储传感器的数据，同时将传感器采集到的数据通过简单的方式进行可视化显示。但是数据智能处理和基于云端服务器分析结果的功能还处于发展初期，但是将是未来几年内的研究热门。目前已有部分产品通过模式识别算法提醒用户如何改善环境，通常包括一些简单的操作，如多给房间通风来提高氧含量并降低二氧化碳含量，最终达到提高人们在室内的健康状态的目的。将来，这类产品还能基于天气、空气质量、个人生理状态来为用户提示最佳的运动时间，或者如果日常路线上污染物超过上限，即提示用户更改上班或上学的路线。

身体健康与环境监测传感器会继续相互结合，帮助公众更好地保持身体健康。在相关研究领域，多参数传感器已经用来检测环境因素对人们生理和心理健康的影响。个人作为移动式传感器检测周边环境的众包应用正在开发传感技术新的用途，这对市民改善居住环境来保持身体健康越来越重要。

未来，市民作为传感器检测周围多变的环境对移动地采集数据很重要，这样的方式是有机的和有益的，势必超越将传感器固定在家中或其他环境中的方式。diffus.dk、亚历山德拉研究所、丹麦设计学院和 Foster Rohner 刺绣公司合作生产了一款通过集成的照明发光二极管能检测二氧化碳的裙子（Johannesen，2009）。类似的还有带有 pH 值敏感染料的裙子，能够随着降雨的酸碱度改变颜色（Chua，

2012)。新的材料如微纳材料可以通过可变的性质，如颜色、极性、多孔性来反映环境中的危险因素，如污染物。如果将这些材料制成可穿戴的款式，则可以智能化地提醒用户环境受到污染，从而帮助用户避免接触污染物。将服饰和环境检测的概念结合虽然还处于实验阶段，但是这种穿戴式技术可能会出现新的用途。其中最重要的用途之一是检测危险气体，用来保护应对突发事件的人员。

但是，在受益环境检测技术前，还有许多困难有待解决。其中最关键的一点就是在尽量不提高成本的前提下提高传感器的质量。目前消费者购买的产品大多使用半导体传感器，而半导体传感器的敏感性和对特定气味的选择性较差。除此之外，传感器还存在基线漂移的现象，未经校准的数据一般都是有误的。低成本、稳定、敏感的传感器将来会是该领域研究的重点。

利用生物传感器鉴定特定细菌或其他生物物种的污染依然还处于初始阶段，而这类传感器的需求是始终存在的，每年约有 340 万人死于水质问题、环境卫生、或其他卫生问题（Lees，2013）。随着生物、光学、封装技术的发展，检测生物污染的操作将可在实验室以外完成（Banna et al.，2013）。例如光学传感装置已经用于其他检测，如检测水中的化学物质。相比传统的电化学传感检测技术，光学法检测结果更加稳定，灵敏度有时也能接近电化学法（Namour et al.，2010，Pellerin et al.，2009）。往往将有前景的研究结果投入实际使用总是很困难。但是，根据目前传感装置的发展来看，传感检测技术将会被挖掘出新的用途。

即使很多人愿意使用单个的传感器，但是利用无线传感器网络监测环境是必然的，且由于存在很多的困难需要克服，目前还没有真正实现可拓展的无线传感器网络。Corke 等人的综述里指出，当前的传感器网络规模十分小（一般节点少于 30 个）且工作时间较短（几周或几个月），由于技术和成本的限制，使得大规模的包含成百上千个节点的传感器不可行。但是，一些具有科研意义的地方，如用来研究温室气体排放和试行水质监测方法的地方，可能会使用大规模、长时间工作的传感器网络（Corke et al.，2010）。

充分肯定的一点是我们将不再受传感器形态的局限，人类本身可以在检测周边环境中扮演重要角色，改善获取环境数据的方式。随着技术的发展，以及数据质量和种类的增加，传感器采集到的数据将可实现任意我们能够想到的功能。最基本的用途即帮助我们更好地理解身体健康状态与我们工作、居住、娱乐的环境之间的关系。

11.8　小结

本章详细描述了将传感器用于监测环境，检测的关键参数包括空气质量、水质、太阳辐射、放射性辐射以及噪声污染。全球快速的城市化、工业化，以及人类各种行为都给整个环境增加了压力，因此监测环境资源的必要性也日益增加。新型的传感技术与应用方式层出不穷，为授权的用户提供许多有关周边环境的数据和信息，从而帮助人们更好的理解环境与身体状况之间的联系。用作私人用途的传感器也促进了企业的产品研发，用户利用现有的产品，能够收集和共享数据和重要的环境参数，如空气质量，这是传统的政府管理的监测系统无法实现的功能。

参考文献

Barnoya, Joaquin and Stanton A. Glantz, "Cardiovascular Effects of Secondhand Smoke Nearly as Large as Smoking," *Circulation,* vol. 111 pp. 2684–2698, 2005.

Sasco, A. J., M. B. Secretan, and K. Straif, "Tobacco smoking and cancer: a brief review of recent epidemiological evidence," *Lung Cancer,* vol. 45, Supplement 2 (0), pp. S3–S9, 2004.

Bretveld, Reini, Marijn Brouwers, Inge Ebisch, and Nel Roeleveld, "Influence of pesticides on male fertility," *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health,* vol. 33 (1), pp. 13–28, 2007.

Balabanic, Damjan, Marjan Rupnik, and Aleksandra Krivograd Klemencic, "Negative impact of endocrine-disrupting compounds on human reproductive health," *Reproduction, Fertility and Development,* vol. 23 (3), pp. 403–416, 2011.

IHME, "The Global Burden of Disease: Generating Evidence, Guiding Policy", Institute for Health Metrics and Evaluation, Seattle, Washington, 2013.

Quantified Self Labs, "Quantified Self - self knowledge through number ", http://quantifiedself.com/, 2012.

Linear-Technology, "Wireless Sensor Network Challenges and Solutions", http://cds.linear.com/docs/en/white-paper/wp001fa.pdf, 2012.

Ghosh, Amitabha and Sajal K. Das, "Coverage and connectivity issues in wireless sensor networks: A survey," *Pervasive and Mobile Computing,* vol. 4 (3), pp. 303–334, 2008.

Mainwaring, Keith and Lara Srivastava, "The Internet of Things - Setting the Standards," in *The Internet of Things: Connecting Objects,* Chaouchi, Hakima, Ed., Hoboken, New Jersey, Wiley, 2010, pp. 208–2010.

Conway, Maura, "What is Cyberterrorism and How Real is the Threat?," in *Law, Policy, and Technology,* Reich, Pauline C. and Eduardo Gelbstein, Eds., Hershey PA, IGI Global, 2012, pp. 279–307.

Zervous, Barry. "*Q&A on energy harvesting, wireless sensors, wireless sensor networks,*" Last Update: April 4th 2013, http://www.energyharvestingjournal.com/articles/q-amp-a-on-energy-harvesting-wireless-sensors-wireless-sensor-networks-00005316.asp

Boisvert, Sarah. "*3D printing enclosures for micro wireless sensors and circuits inexpensive and practical solution for company,*" Last Update: 2013, http://www.3dprinter.net/3d-printing-enclosures-for-micro-wireless-sensors-and-circuits

Crisostomo, Christian, "*Monitor Air Pollution with Smartphone Accessed Portable Sensors*", The Environmental Blog.org, Last Update: January 20th 2013, http://www.theenvironmentalblog.org/2013/01/monitor-air-pollution-smartphone-accessed-portable-sensors/

Sensorcon. "*Make Sensordrone Do Even More,*" Last Update: 2013, http://www.sensorcon.com/sensordrone-extensions/

Choi, Sukwon, Nakyoung Kim, Hojung Cha, and Rhan Ha, "Micro Sensor Node for Air Pollutant Monitoring: Hardware and Software Issues," *Sensors,* vol. 9 pp. 7970–7987, 2009.

Romain, A. C. and J. Nicolas, "Long term stability of metal oxide-based gas sensors for e-nose environmental applications: An overview," *Sensors and Actuators B: Chemical,* vol. 146 (2), pp. 502–506, 2010.

Grossi, M., *et al.*, "A Portable Sensor With Disposable Electrodes for Water Bacterial Quality Assessment," *Sensors Journal, IEEE,* vol. 13 (5), pp. 1775–1782, 2013.

Mannoor, Manu S., Siyan Zhang, A. James Link, and Michael C. McAlpine, "Electrical detection of pathogenic bacteria via immobilized antimicrobial peptides," *Proceedings of the National Academy of Sciences,* vol. 107 (45), pp. 19207–19212, 2010.

Department of Environment and Heritage Protection - Queensland Government, "Sulfur Dioxide", http://www.ehp.qld.gov.au/air/pollution/pollutants/sulfur-dioxide.html, 2011.

EPA. "*Mobile Air Monitoring on the Gulf Coast: TAGA Buses,*" Last Update: 2010, http://www.epa.gov/bpspill/taga.html

Standards, European, "http://www.en-standard.eu/csn-en-12341-air-quality-determination-of-the-pm10-fraction-of-suspended-particulate-matter-reference-method-and-field-test-procedure-to-demonstrate-reference-equivalence-of-measurement-methods/Air " vol. CSN EN 12341, ed: European Standards, 1998.

EPA, "National Ambient Air Quality Standards for Lead; Final Rule," vol. 73 FR 66964 ed. United US Environmental Protection Agency 2008.

Evironemental Protection Agency-Ireland, "What is the Air Quality Index for Health", http://www.epa.ie/air/quality/index/#d.en.51765, 2013.

EPA. "*Air Quality Index (AQI) - A Guide to Air Quality and Your Health,*" Last Update: May 17th 2013, http://www.airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi#good

The World Data Centre for Remote Sensing of the Atmosphere (WDC-RSAT), "GOME-2 Global Ozone Monitoring Experiment", http://wdc.dlr.de/sensors/gome2/, 2103.

CBS. "*NASA releases images of Beijing air pollution,*" Last Update: January 15th 2013, http://www.cbsnews.com/8301-205_162-57564051/nasa-releases-images-of-beijing-air-pollution/

Hidy, George, *et al.*, "Remote Sensing of Particulate Pollution from Space: Have We Reached the Promised Land?," *Journal of the Air & Waste Management Association,* vol. 59 (6), pp. 645–675, 2009.

MedLibrary.org. "*Satellite temperature measurements,*" Last Update: 2013, http://medlibrary.org/medwiki/Satellite_temperature_measurements

Jen-Hao, Liu, *et al.*, "Developed urban air quality monitoring system based on wireless sensor networks," in *Sensing Technology (ICST), 2011 Fifth International Conference on,* 2011, pp. 549–554.

Murty, R., *et al.*, "Citysense: An urban-scale wireless sensor network and testbed," presented at the IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security, Boston, MA, 2008.

Morreale, P., *et al.*, "Real-Time Environmental Monitoring and Notification for Public Safety," *MultiMedia, IEEE,* vol. 17 (2), pp. 4-11, 2010.

Bagula, Antoine, Marco Zennaro, Gordon Inggs, Simon Scott, and David Gascon, "Ubiquitous Sensor Networking for Development (USN4D): An Application to Pollution Monitoring," *Sensors,* vol. 12 (1), pp. 391-414, 2012.

Li, Jason Jingshi, Boi Faltings, Olga Saukh, David Hasenfratz, and Jan Beutel, "Sensing the Air We Breathe — The OpenSense Zurich Dataset," in *Proceedings of the Twenty-Sixth AAAI on Artificial Intelligence*, Toronto, Ontario, Canada, 2012, pp. 323-325.

Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology "Empa - a Research Institute of the ETH Domain", `http://www.empa.ch/plugin/template/empa/4/*/---/l=2`, 2013.

Hasenfratz, David, Olga Saukh, and Lothar Thiele, "On-the-Fly Calibration of Low-Cost Gas Sensors," in *Wireless Sensor Networks.* vol. 7158, Picco, GianPietro and Wendi Heinzelman, Eds., Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 228-244.

Keller, M., J. Beutel, O. Saukh, and L. Thiele, "Visualizing large sensor network data sets in space and time with vizzly," in *Local Computer Networks Workshops (LCN Workshops), 2012 IEEE 37th Conference on,* 2012, pp. 925-933.

Nafis, Chris. "*Air Quality Monitoring*," Last Update: 2012, `http://www.howmuchsnow.com/arduino/airquality/`

Jiang, Yifei, *et al.*, "MAQS: a personalized mobile sensing system for indoor air quality monitoring," presented at the Proceedings of the 13th international conference on Ubiquitous computing, Beijing, China, 2011.

Wright, Anne, Candide Kemmler, and Rich Gibson. "*BodyTrack: Open Source Tools for Health Empowerment through Self-Tracking*," Last Update: July 18th 2012, `http://www.oscon.com/oscon2012/public/schedule/detail/24733`

Aoki, Paul M., *et al.*, "Common Sense: Mobile Environmental Sensing Platforms to Support Community Action and Citizen Science", Computer Interaction Institute `http://www.paulos.net/papers/2008/CommonSense%20UbiComp2008Demo.pdf`, 2008.

Westly, Erica. "*Citizen Science: How Smartphones Can Aid Scientific Research*," Last Update: 2009, `http://www.popularmechanics.com/science/4308375`

Zappi, Piero, Elizabeth Bales, Jing Hong Park, William Griswold, and Tajana Šimunić Rosing, "The CitiSense Air Quality Monitoring Mobile Sensor Node," presented at the 2nd International Workshop on Mobile Sensing (ISPN'12), Beijing, China, 2012.

The Copenhagen Wheel, "The Copenhagen Wheel", `http://senseable.mit.edu/copenhagenwheel/index.html`, 2013.

Mendez, D., A. J. Perez, M. A. Labrador, and J. J. Marron, "P-Sense: A participatory sensing system for air pollution monitoring and control," in *Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops), 2011 IEEE International Conference on,* 2011, pp. 344-347.

Saavedra, Joe. "*Citizen Sensor - DIY Environmental Monitoring - Development Blog*," Last Update: 2013, `http://thesis.jmsaavedra.com/concept/`

Ganapati, Priya. "*Android App Uses Cellphone Camera to Measure Air Pollution*," Last Update: September 24th 2010, `http://www.wired.com/gadgetlab/2010/09/cellphone-camera-air-pollution/`

Sensaris. "*Discover of SensPods*," Last Update: 2013, `http://www.sensaris.com/products/senspod/`

SmartSantander. "*Smart Santander*," Last Update: 2013, `http://www.smartsantander.eu/`

BarcelonaSmartCity. "*Barcelona Ciutat Intel·ligent*," Last Update: 2013, `http://smartbarcelona.cat/en/`

Amsterdamsmartcity. "*Amsterdam Smart City*", Last Update: 2013, `http://amsterdamsmartcity.com/`

Honjo, Tsuyoshi, "Thermal Comfort in Outdoor Environment," *Global Environmental Research,* vol. 13 pp. 43-47, 2009.

Cheng, Vicky, Edward Ng, Cecilia Chan, and Baruch Givoni, "Outdoor thermal comfort study in a sub-tropical climate: a longitudinal study based in Hong Kong," *International Journal of Biometeorology,* vol. 56 (1), pp. 43-56, 2012.

Johansson, Erik and Rohinton Emmanuel, "The influence of urban design on outdoor thermal comfort in the hot, humid city of Colombo, Sri Lanka," *International Journal of Biometeorology,* vol. 51 (2), pp. 119-133, 2006.

Krüger, Eduardo, Patricia Drach, Rohinton Emmanuel, and Oscar Corbella, "Urban heat island and differences in outdoor comfort levels in Glasgow, UK," *Theoretical and Applied Climatology,* vol. 112 (1-2), pp. 127-141, 2013.

Höppe, Peter, "Aspects of human biometerology in past, present and future," *International Journal of Biometeorology,* vol. 40 (1), pp. 19-23, 1997.

Shuo, Liu, Zhou Guomo, and Mo Lufeng, "The green space monitoring system based on Wireless Sensor Network," in *Education Technology and Computer (ICETC), 2010 2nd International Conference on,* 2010, pp. V5-180-V5-183.

Gaffin, Stuart R., Reza Khanbilvardi, and Cynthia Rosenzweig, "Development of a Green Roof Environmental Monitoring and Meteorological Network in New York City," *Sensors,* vol. 9 pp. 2647-2660, 2009.

Cohen, Pninit and Oded Potchter, "Daily and Seasonal Air Quality Characteristics of Urban Parks in the Mediterranean City of Tel Aviv," presented at the CLIMAQS Workshop, Antwerp, Belgium, 2010.

Gillette, Bill, "*Pollution and UV Damage*", The Centre for Dermatologic Surgery, Last Update: 2011, `http://blogs.cooperhealth.org/drlawrence/2011/03/pollution-and-uv-damage/`

Holick, Michael F., *et al.*, "Evaluation, Treatment, and Prevention of Vitamin D Deficiency: an Endocrine Society Clinical Practice Guideline," *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism,* vol. 96 (7), pp. 1911-1930, 2011.

SunSignal Sensors, "How It Works", `http://sunsignals.com/how-it-works/`, 2013.

UVSunSense. "*UVSense Wristbands*," Last Update: 2013, `http://www.uvsunsense.com/uvss/`

Biosense. "*High quality personal dosimetry*," Last Update: 2013, `http://www.biosense.de/home-e.html`

ICEPURE. "*ICEPURE: The impact of climatic and environmental factors on personal ultraviolet radiation exposure and human health*," Last Update: 2009, `http://icepure.eu/WP_descriptions.html`

Lamkin, Paul. "*DoCoMo breath testing smart jacket pictures and hands-on*," Last Update: October 7th 2011, `http://www.pocket-lint.com/news/112373-docomo-breath-testing-hands-on`

Fahrni, Thomas, Michael Kuhn, Philipp Sommer, Roger Wattenhofer, and Samuel Welten, "Sundroid: Solar Radiation Awareness with Smartphones," in *13th International Conference on Ubiquitous Computing (Ubicomp '11)*, Beijing, China, 2011, pp. 365–374.

MIT Mobile Experience Laboratory, "Mobile UV Monitor", http://mobile.mit.edu/portfolio/mobile-uv-monitor/, 2011.

Igoe, Damien, Alfio Parisi, and Brad Carter, "Characterization of a Smartphone Camera's Response to Ultraviolet A Radiation," *Photochemistry and Photobiology*, vol. 89 (1), pp. 215–218, 2013.

Carnegie-Mellon. "*WaterBot*," Last Update: 2013, http://waterbot.org/

Kimmel, Danielle W., Gabriel LeBlanc, Mika E. Meschievitz, and David E. Cliffel, "Electrochemical Sensors and Biosensors," *Analytical Chemistry*, vol. 84 pp. 685–707, 2011.

Lagarde, Florence and Nicole Jaffrezic-Renault, "Cell-based electrochemical biosensors for water quality assessment," *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 400 (4), pp. 947–964, 2011.

Jang, Am, Zhiwei Zou, Kang Kug Lee, Chong H Ahn, and Paul L Bishop, "State-of-the-art lab chip sensors for environmental water monitoring," *Measurement Science and Technology*, vol. 22 (3), 2011.

Rassaei, Liza, *et al.*, "Nanoparticles in electrochemical sensors for environmental monitoring," *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 30 (11), pp. 1704–1715, 2011.

Namour, Philippe, Mathieu Lepot, and Nicole Jaffrezic-Renault, "Recent Trends in Monitoring of European Water Framework Directive Priority Substances Using Micro-Sensors: A 2007–2009 Review," *Sensors*, vol. 10 pp. 7947–7978, 2010.

IBM. "*IBM Aims to Help Alleviate Water Shortages in Northern California's Wine Country*," Last Update: June 25th 2010, http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/31995.wss

Becaon Institute, "Beacon Institute and IBM Team to Pioneer River Observatory Network", http://bire.org/institute/ibm.php, 2007.

Percifield, Leif. "*dontflush.me*," Last Update: 30th October, 2012, http://dontflush.me/about

Kramer, Herbert J. "*Argo (Data Collection in the Global Oceans)*," Last Update: 2013, http://www.eoportal.org/directory/pres_ArgoDataCollectionintheGlobalOceans.html

EPA. "*Microbial (Pathogen)*," Last Update: November 2nd 2012, http://water.epa.gov/scitech/swguidance/standards/criteria/health/microbial/index.cfm

Insta-Link, "Get Started with an Advanced SmartScan™ Kit", http://insta-link.com/poolspa/learn_morehome.html?tab=2#tabbedpanels1, 2012.

Edgar, Tricia. "*Smartphones to Determine Water Quality*," Last Update: June 4th 2013, http://www.kalev.com/clean-water-from-the-cloud-mobosens-uses-smartphone-technology-to-determine-water-quality/

Maisonneuve, Nicolas, Matthias Stevens, Maria E. Niessen, Peter Hanappe, and Luc Steels, "Citizen noise pollution monitoring," presented at the Proceedings of the 10th Annual International Conference on Digital Government Research: Social Networks: Making Connections between Citizens, Data and Government, 2009.

Rana, Rajib Kumar, Chun Tung Chou, Salil S. Kanhere, Nirupama Bulusu, and Wen Hu, "Ear-phone: an end-to-end participatory urban noise mapping system," presented at the Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, Stockholm, Sweden, 2010.

Kanjo, Eiman, "NoiseSPY: A Real-Time Mobile Phone Platform for Urban Noise Monitoring and Mapping," *Mob. Netw. Appl.*, vol. 15 (4), pp. 562–574, 2010.

Bergner, Benjamin, Jan-Philipp Exner, Peter Zeile, and Martin Rumberg, "Sensing the City – How to identify Recreational Benefits of Urban Green Areas with the Help of Sensor Technology," presented at the RealCORP, Vienna, 2012.

Martí, IreneGarcia, *et al.*, "Mobile Application for Noise Pollution Monitoring through Gamification Techniques," in *Entertainment Computing - ICEC 2012*. vol. 7522, Herrlich, Marc, Rainer Malaka, and Maic Masuch, Eds., Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 562–571.

EPA. "*Radon - Health Risks*," Last Update: March 19th, 2013, http://www.epa.gov/radon/healthrisks.html

Boyd, Mark. "*Sensors Monitor Radiation in Japan - Engineers give data to the people*," Last Update: May 1st 2011, http://www.deskeng.com/articles/aabawh.html

Safecast, "*Safecast - A Global Sensor Network Collecting and Sharing Radiation Measurements*", Last Update: 2013, http://blog.safecast.org/about/

Lawrence, Dune. "*China Says Sanlu Milk Likely Contaminated by Melamin*," Last Update: September 12th 2008, http://www.bloomberg.com/apps/news?pid=newsarchive&sid=at6LcKJB6YA8

Isakovic, Alja, "*An important milestone for CubeSensors: the Summer batch sold out in just a month!*", CUBESENSORSBLOG, Last Update: April 16th 2013, http://blog.cubesensors.com/2013/04/an-important-milestone-for-cubesensors-the-summer-batch-sold-out-in-a-month/

Johannesen, Hanne-Louise. "*Pollution sensoring and visualizing garment (CO2-dress)*," Last Update: December 15th 2009, http://www.fashioningtech.com/photo/album/show?id=2095467%3AAlbum%3A12419

Chua, Jasmin Malik. "*Dahea Sun's Cabbage-Dyed Dresses Change Color to Indicate Rain's pH*," Last Update: June 27th 2012, http://www.ecouterre.com/dahea-suns-cabbage-dyed-dresses-change-color-to-indicate-rains-ph/

Lees, Kathleen. "*World Water Day: 3.4 Million People Die Each Year from Water, Sanitation, and Hygiene-Related Causes*," Last Update: March 23rd 2013, http://www.scienceworldreport.com/articles/5756/20130323/world-water-day-3-4-million-people-die-each-year.html

Banna, Muinul H., *et al.*, "Online drinking water quality monitoring: review on available and emerging technologies," *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, pp. null-null, 2013.

Pellerin, Brian A., *et al.*, "Assessing the sources and magnitude of diurnal nitrate variability in the San Joaquin River (California) with an in situ optical nitrate sensor and dual nitrate isotopes," *Freshwater Biology*, vol. 54 (2), pp. 376–387, 2009.

Corke, P., *et al.*, "Environmental Wireless Sensor Networks," *Proceedings of the IEEE*, vol. 98 (11), pp. 1903–1917, 2010.

第 12 章　总结与展望

本章中，我们将总结前面章节所提到的主要内容，回顾目前在医疗、保健以及与健康相关的环境监测中推动传感器应用的重要影响。通过研究一些新兴的发展趋势，包括传感器在很多方面将如何成为我们生活中不可或缺的一部分，我们对传感器的未来充满了期待。此外，还将讨论技术的变革如何带来了广泛的联系和量化计算，以及它将如何影响未来传感器的应用，并研究众包模式如何授权于公众，这将给未来传感器的应用增加创新的元素。最后，我们将探讨源自于传感器与信息通信技术的传感技术交互，创新的传感技术应用将使我们在行为和生活方式的选择以及其他因素如何影响我们健康方面产生新的观点。

12.1　现状

在本书中，我们看到了很多影响医疗、保健与环境监测等应用发展的关键驱动因素。老龄化、水资源匮乏、环境污染等全球性挑战需要有创新的解决方案。传感器已经在创新中起到了关键作用，如使周围的世界更智能，以便不断改善我们的生活质量，更好地利用我们的资源，并减少我们对地球的影响。传感器对于实现创新解决方案的作用将在未来几十年内继续不断增长。传感器技术成本的下降是其使用量快速增长的关键因素。例如，相比过去五年，MEMS 加速度计的成本已经下降了 80% ~90%（Manyika et al.，2013）。如第 4 章和第 5 章所述，传感器技术的进步与基础设施建设进程紧密相连，将推动传感器数据聚合、处理、传输、存储和可视化等各个领域的发展。机器对机器（Machine - to - Machine，M2M）与物联网（Internet of Thing，IOT）的革新是基础设施建设利用传感器技术来推进本领域当前状态的典型范例。通过在已有产品上安装传感器使其成为新的产品范畴来产生新的收入来源。这些数据可以被用于支持改善客户服务并提高产品开发（Economist，2013）。

我们已经描述了多种常用的检测方法。在过去 30 年中，生物传感器和 MEMS 技术等新的检测方法的发展显著增加了有效应用的广度。我们见证了设备成本的显著降低和基于传感器的设计方案普遍增多。这些发展正好与信息通信技术（Information and Communications Technology，ICT）集成到传感器相同步。计算量、存储容量和通信能力的增加迎来了智能传感器时代。无线通信技术搭建了无线传感器网络平台，让我们可以实现无处不在的环境感知。最近，智能手机和平板电脑集成传感器技术显著影响了普通大众的生活。自 2007 年 iPhone 手机的推出，智能手机和

平板电脑的销量增加了6倍（Manyika et al.，2013）。互联网数据中心预计，到2017年智能手机的销量将达到17亿台（Llamas et al 2013）。大约56%的美国人已经在使用智能手机访问互联网，而有31%的人使用智能手机来收集和获得健康和医疗信息，该数据自2008年以来增长了50%左右（Jones，2012）。同样，目前美国成人平板电脑的拥有率达到了全球销量的34%（Zickuhr，2013），预计2017年将达到4亿台（Mainelli，2013）。智能手机和平板电脑提供了一个直观的平台，用户可以按照所需通过传感器收集、处理并分享数据。这个相对抽象或被许多人认为需要专业人员维护的技术目前已经可以为普通人提供实际的应用。

追踪、共享、建立健康和保健知识库等行为利用基于信息通信技术的感知能力都可以实现自我量化。这种感知形式也将促使医学界新思维的诞生。这种模式使后置反馈治疗朝着前置健康管理与预防方向转移。传感器用于确定某些疾病的早期征兆并在发生严重健康问题前做出干预。传感器还支持个性化药物，针对个人独特的生物化学和DNA特性进行治疗。这种对个性化诠释的愿景已经渗透到我们的社交及娱乐活动中。我们已经看到了很多传感技术如何普遍地运用在运动和健康的医疗监护中。我们对环境如何影响健康也越来越感兴趣，也生产了很多相关的商业产品，许多专业人士和技术爱好者也搭建了监测空气、水、环境噪声等更多的平台。

随着生活方式联系的不断增多，社交数据成为贯穿我们应用领域中不变的主题。移动设备实现了无处不在的连接，结合基于可扩展的云计算和存储能力，使在源头上共享实时数据成为可能。在线社区的集体力量正在被运用于对数据源的意义剖析，前后情景的推断，并根据需求触发行动。越来越多的手机传感器推动众包数据集的增长。最初的应用一直专注于参与感，需要个人主动参与到传感检测过程中。在未来，伺机传感技术可能变得很常见，个人可能在不知情的情况下接受来自个人设备如智能手机上的传感检测。位置、活动等状态的变化将被自动检测，这将触发新环境下传感器数据的收集。在经过初始设置后，该设备的所有者不需要在传感检测过程中发挥主动作用（Lane et al.，2008）。当然，为了保护参与者，隐私数据必须谨慎管理。城市中如对环境的传感检测可利用这些方法实现本不可能实现的传送规模和密度（Kapadia et al.，2009）。这些方法发挥了以人为中心的传感检测的影响力，以避免昂贵的基础设施使用，创建了新的传感检测模式。同样，由于传感器被内置到越来越多的设备中，无限可被感知的“事物”可能带来相应的数据增长。“传感器大数据”时代已经来临，伴随着巨大的挑战，将有很大的机会产生令人激动的创新。相较于频率、音量等多种传感数据的增加，数据可视化具有相同的重要性。数据可视化使人们能够理解已发现的知识信息。可视化还增加了数据活力，这是激发和保持用户参与度并使数据可处理的重要因素。大数据分析将让人们能够以有意义的方式连接自己的数据，并让人们看到这将如何改变他们的行为和生活方式。就个人而言，我们最终希望传感器数据可以提出具体的可操作性建议。

在本书中，我们一直关注现实中基于传感器的期望。需要强调的是，传感器并

不是解决所有问题的灵丹妙药。它们可以给出创新的解决方案，但需要它们的工作特性适当匹配到所需的应用。一些传感器技术，尤其是无线传感器网络，一定程度上被过分夸大了。成千上万的网络节点尚未建成，有许多技术和后勤问题阻碍着这一目标的实现。有人在大肆宣传无处不在的无线传感器网络可以解决我们所有的问题，如果抛开这样的炒作，我们发现在小规模的集中使用中已经成功实践，如老年人的健康监控。实际情况可能在一段时间后正如炒作所说，在可预见的将来，这些网络的价值将针对一些具体的应用实现更微观层面的使用。

连续量化描述我们的健康和保健情况，在个人和社会上都将产生显著的和潜在的影响。但我们小心不要"过度担忧"，不要因为测量中每个小数点的变化就产生偏执的想法。如果人们仅仅是因为一个传感器的读数可能不在所希望的健康范围内就自我怀疑，那对于健康预防只会起到适得其反的作用。只有在适当的情况下正确使用传感器，才能对我们的生活产生巨大的积极影响，并在未来获得广泛应用。那么，什么是适合我们的未来传感器?

12.2 展望

有时通过回顾发生在过去的事情可以看到未来。例如，温度的测量可以追溯到远古时代。古罗马拜占庭和亚历山大式的英雄斐洛（Philo）的作品展示了一个早期测温仪，其中有一个部分充满空气的玻璃管，该管的一端放入盛水的容器中，由于温度变化导致的空气膨胀和收缩，从而改变水和空气在管壁上的界线。在 16 世纪和 17 世纪，包括伽利略在内的许多欧洲科学家都致力于进一步发展测温仪。Sanctorio Sanctorius 和/或 Gianfrancesco Sagredo 在测温仪中加入测量标准，发明了第一个初步的空气温度计（Chew，2008 年）。1709 年，德国物理学家 Daniel Gabriel Fahrenheit 发明了一种酒精温度计，并在 1724 年发明了水银温度计，并在当年提出了标准化的华氏温标。

1742 年，摄氏温标由瑞典天文学家 Anders Celsius 发明。这种温标在海平面的大气压力下把温度从冰点（0℃）到水的沸点（100℃）之间分为 100℃。开氏温标是 1848 年由 Lord Kelvin 发明的，标定冷热两个极端，从绝对零度即 -273℃ 开始。1866 年，Thomas Clifford Allbutt 爵士发明一个体温计，可以在 5min 内读取温度（Prater，2008）。这可以使临床医生建立体温与患者健康状况之间的关系。在过去的几十年里，从一开始缓慢的研究，到各种传感方式的温度传感器爆炸式的激增，现代温度传感器包含基于热敏电阻、热电偶、非接触传感器和光纤等各种技术，测量精度达到 0.001℃，具有高度集成的信息通信技术能力。相对于早期的测温仪已取得了显著的进步。这与探索很多现代常用的传感器感应原理的过程类似，都是基于几十年或几百年的精心工作，以建立和验证其运作的科学原理。结合其他众多技术的发展，这些艰苦的努力为开拓广泛的应用领域奠定了深厚的科学基础并提供显

著的帮助。现在，传感器技术在某些方向已趋于成熟，我们正处在爆炸式增长的多样性应用与产品的顶峰。

在医疗保健、环境监测等传感器与应用的背后，技术和创新解决方案的稳步增长成为主要势头。与这一势头相伴产生的是移动通信与云计算的普及，未来将出现一个明确的转折点，其代表着基于遥感和信息通信技术的变革，让我们从目前的反馈医疗模式转向健康保健模式。下一节将介绍一些影响未来热门传感器发展的关键领域。

12.2.1 普遍性

我们正在进入一个传感器已经成为我们日常生活中不可或缺的时代。新型的传感器正在不断地出现，它们可以安放在周围环境中，或穿戴在身上，或集成到下一代智能设备里。这些设备采用了先进的内置传感功能，应用于改善世界各地数十亿人的健康和幸福，这些传感器已经放置到我们周围环境中，被动地监视人们的行动、行为和环境状态，且不会引起人们的注意。虽然技术挑战依然存在，但基本的通信与传输网络已经搭建完成。空气质量、照明水平、噪声等级等将根据初始设置自我调整和改善，使生活环境变得更加智能。从长远看，随着集成传感智能家居技术变得更加普遍，生活环境会自动调整到最适合居住者健康和幸福的模式。经过过去十年的研究，特别是在模拟生活的实验室中，已经展示了这种传感功能如何在家庭环境中使用。在将来，环境将变得更加的复杂，它们要有能力从正常的行为模式中找出可能表明存在潜在健康问题的变化模式。

传感器将被设计成人们每天已经在使用或携带的对象。如第 10 章所述，现实中传感器已经成为“日常技术”，如人们日常佩戴的行为监护仪、运动监护仪等。在不久的将来，传感器将配置在日常物品等新设备中，如多感官健康监护智能手机或环境感知智能服装。这些设备将越来越多地拥有理想的美学设计（Sarasohn - Kahn，2013）。这种趋势已经反映在家庭环境的传感产品中，如 Netamo 无线气象站，其设计理念可视为对理想的生活方式的选择。传感器也将越来越多地被集成到日常设备中，在许多情况下，用户无法在使用的设备上看见它们。例如现代的汽车可能拥有超过 100 个不同的传感器类型。这款车的车主并不一定知道它们在哪里，但传感器可以提升驾驶体验，使驾驶更加安全，同时具有更好的燃油使用效率并减少对环境的影响。可以想象在更加关注健康与医疗的未来，数据将全天主动或被动地被传感器收集。通过多种多样的个人设备，能够获得我们需要的数据，提前通知并尽早解决潜在的问题。例如，想象这样的生活，当你开着与云端相连的汽车上下班，挡风玻璃上会显示你的每周健康评估报告。

消费市场不断增长的商业化传感器解决方案将加速传感器的应用与扩展。我们正在见证着行为监测和健康监护设备进入公众的意识。所有的规划都指向一个将在未来十年内显著增长的市场。目前，已有跨国品牌意识到不断增长的商机，纷纷进

入健身传感市场，在未来几年内，希望看到更多拥有成熟技术的专业人士进入市场，并带来自己提供的产品或相关的投资公司。与大多数市场一致，在短期内，我们可能会看到一批新的产品出现，最初的涌入后会看到很多赢家和输家，当市场成熟后，消费者的购买决策表明哪些产品是最引人注目的。随着技术的发展，众包融资的概念变得更加主流，为了解决共同体认定和资助的具体问题，新的传感器方案将会出现。这些共同体也将作为值得信赖的倡导者，将对解决方案的采用率产生积极的影响。在第 11 章中描述的 AirQualityEgg 传感器是由设计师、技术人员、开发人员、架构师、学生和艺术家等共同努力完成的。这个共同体以开发传感器技术为目标，没有既得的利益，旨在让广大市民能参与到和促进空气质量有关的话题讨论中。智能手机和平板电脑将继续促进个性化传感器的应用。这些设备中内置传感器的数量将不断增长，从而产生新的使用模式。专用传感器在移动平台的集成也将作为一个重要推动因素，其拥有可预测性和扩展性等更好的性能。

利用当前和未来手持机中的各种传感器是计算革新的下一个阶段。现代移动设备已普遍包含加速度计、磁力计和环境光传感器，并结合了 GPS、无线通信、带宽感知等传感器技术。未来会有如心电图（Electrocardiography，ECG）监护等更多类型的传感器被集成到智能手机中。这些拥有自动传感功能的设备将变得更加流行，因为它们能降低感知过程中对人们主观行为的需求。人们与这些设备的互动行为提供了丰富的数据，可以用来深入研究认知幸福感与认知心理学等领域（Lee et al.，2012；Miller，2012）。研究人员从智能手机传感器获得环境信息数据，并使用分类技术对人类行为方式进行建模（Pei et al.，2013）。虽然这些类型的应用仍然在研发阶段，但根据基础设施的最低需求，其具有潜在的发展规模，可以看到在不久的将来它们将成为临床健康监护的主流。

12.2.2　技术

无论是改进现有的方法，还是开拓新的传感模式，传感器技术都将继续发展。商业需求将推动传感器技术的革新。人们主动了解并管理个人健康的愿望将驱动新消费市场的兴起。运动健康与医疗监护的交叉越来越多，由此产生了传感器技术的新需求。

新的传感器将达到更低的检出限，具有更高的选择性和灵敏度，并增强了稳定性。特别是生物传感器将拥有通过生化标志物早期诊断疾病的潜力。它们可以快速识别生化污染物，在有需要的环境检测应用中发挥关键的作用，例如快速识别饮用水被细菌污染的可能性。实现这一目标的一个关键步骤是实验室单芯片技术的进一步发展。这些纳米级的系统在单个微芯片上提供自动化实验室的能力，如样本制备、流体处理、分析和传感/检测。随着微机电系统技术的不断进步和半导体制造技术的快速革新，足以大批量、低成本地生产这些器件，并达到所要求的可靠性和稳定性。微机电系统技术的发展无疑会促进电化学、半导体、光学和运动学传感技

术的发展。

我们也有可能看到光化学传感器在环境应用中的增多，其与现有方法相比提高了可靠性。水检测和环境感知长期独立的运作需要拥有更大的自主权以降低支持成本。该传感器平台将比以往更加智能，并形成智能传感器网络，其具备自动化、远程故障排除、实时遥测等功能，它们的出现将确保面对问题时有最快的响应时间。从水质监测器、地理信息系统、卫星成像等各种来源的数据将在数据分析后便于实时决策支持，以建立环境预测模型。传感检测将在保持稳定性、可靠性和可预见性的环境资源方面发挥越来越大的作用。

未来传感器技术的一个重要领域是无接触式生理感应。任何需要直接接触人体的传感方式都将接受挑战。这种类型的传感存在明显的问题，如实用性、生物相容性和行为修正。非接触式传感提供了捕获所需信号的一种方式，例如通过传感器与笔记本电脑、智能电话、平板电脑等日常设备的集成获得心电图数据。这样的手机应用程序已经出现，如可以使用手机摄像头测量心率。另一个有意义的研究是关于疲劳驾驶，这是长期存在的安全隐患。Mercedes - Benz 公司已推出第一代系统，使用传感器来监测驾驶员的状态。研究人员正在开发下一代非接触式传感系统，通过监测心电图、脑电图和呼吸来检测困倦度。智能服装是非接触式传感的另一个领域，将在近几年不断发展，可监测生理过程并根据环境条件调整服装自身的属性。非接触式传感的发展和成功体现在非常多的针对性特定应用与使用限制中。

如本书所述，智能手机和平板电脑已经对传感器检测及相关应用产生了显著影响。未来在这些平台上很可能看到更多的应用，并且更多的传感能力将被内置到这些设备中。它们将采用离散传感器中心克服目前非确定性采样率等局限性。离散消费者传感器的应用将持续可用，但它们很可能变得更加专业化，因为可用性、取样和卫生因素的限制，它们将无法集成到智能手机或平板电脑上。软件接口或某些情况下的物理接口，特别是一次性传感器，将变得更加标准化。这种集成将支持传感器和集成设备之间拥有更大的互操作性。接口的标准化将确保用户不再依赖于制造商提供的一个特定的端到端解决方案，从而可以选择最适合他们需要的传感器和软件组件。在医疗领域，Continua 联盟已经取得了一定的进展，但仍有大量工作要做。当智能手机拥有更多的个人健康信息，数据安全问题将受到越来越多的关注，尤其是与医疗相关的应用。双重用户资料智能手机等解决方案将可能出现，医疗数据将拥有更强大的安全特性，如本地数据加密。随着移动医疗法规的公布，需要健康声明的智能手机应用程序将受到 FDA 越来越严格的审查。最近的 IMS 市场研究公司报告显示，市场上有很多医疗应用程序似乎用处有限，或者与健康和医疗有着令人质疑的关联（Versel，2013）。这些规则将不可避免地延缓未来移动医疗应用投放到市场。然而，时至今日，这将为移动医疗应用提供一个质量标准和缺少的责任感。

从系统的角度来看，未来将专注于传感器和片上系统（System on Chip，SOC）

设计中信息通信技术组件之间更紧密的集成。该系统将改进具有较低能耗和片上存储器芯片的计算能力。更多的处理将在本地完成，大大减少了网络通信量。这些系统将有更小的物理尺寸，实现小型化。物联网将加速 IP 寻址无线协议、远程传感器的可管理性和轻量通信协议的开发。将传感器连接到基于云存储的服务器将变得和给智能手机配对蓝牙耳机一样直观。这些服务可以让人们能够远程管理工作的时间和方式。低功耗的机器对机器设备和服务将成为推动管理单个传感器和云计算之间关系的关键因素。

传感器系统的速度和精度将不断演变以提供更优的可靠性、灵敏度和选择性。传感器的校准功能将变得更加标准化以延长传感器的使用寿命，理想情况下，系统将实现高度自动化，很少或无需人机交互。目前许多以消费者为导向的传感器在装运前具有有限的校准（例如单个工厂校准）。随着日常生活中的传感器数据的增长，校准不足且质量差的数据结果将不被接受。最终的目标是实现不需要校准的传感器。如库仑传感器（见第 2 章）等方法在原则上并不需要校准，简略展示了未来可能拥有的一些有趣应用。

当前的制造方法对传感器生产的成本、集成和可扩展性方面有一定的局限性。用于打破这些限制的印刷传感器是正在不断发展的一个研究领域。结合基于纳米新材料的现有打印技术拥有提供大规模超低成本生产传感器的潜力。该技术的灵活性可允许传感器印刷在如衣物等日常用品上。例如，欧盟项目 3PLAST（大面积可印刷热电与压电传感器技术）正在研究把压力和温度传感器印刷到塑料膜上生产的方法。该膜可固定到电子设备等物体上。该方法基于可大量被丝网印刷的热电与压电聚合物。该传感器还结合了有机晶体管以提高其信号质量（Printed Electronics World，2010）。同样的，研究人员在加利福尼亚大学已经成功地展示了将电化学传感器直接印刷到氯丁材质的橡胶潜水衣上（Phys. org，2011）。该传感器有两个发光二极管：绿色发光二极管亮起时表明水是安全的，红色发光二极管亮起时表明在水中检测到酚类物质。在生命安全应用方面，研究人员正在研究热通量传感器和运动传感器的潜在用途，其可以直接打印到消防员所穿的防护服上，以检测他们是否处在危险中（Navone et al.，2013，Wei et al.，2012）。在未来几年，我们很可能会看到更多最初专注于提供专业用例的应用程序出现。然而，由于创新产品提供了潜在的商业机会，这些传感技术在消费市场很可能会迅速得到效仿和应用。

一次性生物传感器丝网印刷技术的应用是一个活跃的研究领域。传感器已经通过丝网印刷技术被生产应用于各种分析物的检测中，如有机磷酸酯（农药）（Crew et al.，2011）、赭曲霉毒素 A（由赭曲霉及其衍生物生产的霉菌毒素）（Alonso－Lomillo et al.，2010）和人体血清中的尿酸（痛风、糖尿病和肾结石会导致其含量升高）等（Piermarini 等人，2013 年）。生物文身（或生物邮票）是一种可印刷传感器，在开发的早期阶段已经引起了浓厚的兴趣。例如，生物文身 MC10 已经验证可随皮肤拉伸并监测温度、水合作用和应变能力。使用喷涂绷带保护这些文身传感

器，使它们防水且更加耐用。这种传感器可以持续工作长达两个星期，皮肤自然代谢将导致它们的脱落。下一阶段的发展将专注于和无线通信的融合，使其连接到智能手机上（Etherington，2013）。这种可扩展能力和低成本效益的方法使一次性传感器得到更广阔的应用，作为随身使用的方式在未来将被大众市场所接受。

无线传感器网络及其潜在的创新应用在过去的 20 年已受到很大的关注。不清楚的是大型无线传感器网络能否不辜负围绕它们产生的各种宣传。传感器数量较少的小型网络已成功从研究阶段步入现实商品。尽管一些技术挑战依然存在，但商业开发将持续加快。然而，对于需要数百或数千个传感器节点的应用，这一方向的道路还不明确。迄今为止最大的规模为数百个节点。没有人真正在任何一个城市或农村等大区域环境中实现大规模使用。如果没有这样的使用，“围绕规模的实际问题则尚未得到充分探讨”（Corke et al.，2010）。因此，各地使用的真实成本以及它们是否在经济上可行的问题仍然没有答案。环境条件变化后室外通信的可靠性等其他技术问题还需进一步的研究（Zhu et al.，2012）。用于环境检测的无线传感器网络节点也有可能设有更多更复杂的传感器。这将产生新的挑战，如多传感器数据融合、多元校准策略等。然而，传感器数据流融合能力将成为提供传感器测量环境背景值的一个关键因素。这个信息是至关重要的，特别是对远程使用的传感器节点，因为它可以帮助我们真正了解数据告诉了我们什么。多用途传感器平台的概念也可能出现，来自其中一个使用的传感器及其数据可以在许多应用中共享。这可以把传感基础设施从应用中分离（Leontiadis et al.，2012）。这种方法在许多方面类似于信息技术领域的云计算发展，应用从计算、存储和网络需求中分离。

12.2.3 个性化医疗

通过数字病历和大规模生物医学感测设备的应用，医疗将打破医院的限制并逐渐向数字化领域转型。这将有助于推动实现医学家勒罗伊·胡德的愿景：预测性、预防性、个性化和参与性（P4）（P4 Medicine Institute，2012）。当前行为自我量化（根据个人兴趣使用的技术，例如使用传感器和移动计算收集有关自己身体和心理的性能水平、卫生、食品摄入量、个人环境生活等各个方面的数据）是早期这一愿景的首次尝试。这种监护形式如何服务于大众是一个有争议的话题。那些真正对观察和理解数据告诉了他们什么感兴趣的人将积极推动行为自我量化，而其他不感兴趣的人将不那么有动力。显然，激发大众查看数据的兴趣是十分重要的。然而，为大众提供必要的动机和激励机制将充满潜在的雷区。人们可能会认为它有“国家保姆”的含义，这将在很多方面激起强烈的负面反应。然而，保险公司如何溢价、如何设计监护治疗方案或评估日常生活风险等可能发生的变化将提供鼓励大众的必要动力。例如，加州大学圣地亚哥分校的 Larry Smarr 教授一直为自我量化的实践奉献多年。过去十年中，他一直使用传感器、自检试剂盒和实验室分析跟踪有关他健康的 150 多个变量。根据纵向比较的数据，他能够识别他血液中复杂反应蛋

白（检测是否存在炎症的生物标志物）的水平在峰值时高于正常水平 27 倍。随后，他确定了粪便样本中的乳铁蛋白（一种多功能蛋白质，除其他功能外，是肠道发炎疾病（Inflammatory Bowel Disease，IDB）的一个敏感和特异性生物标志物）达到峰值时是正常水平的 124 倍以上。接着 Smarr 使用这些数据并结合科学文献的研究，自我诊断出克隆氏病。Smarr 也大量使用体感穿戴设备作为他连续监测计划的一种方式。他用 FitBit 跟踪他的活动量，并在晚上使用 Zeo 传感器来监控他的睡眠质量。他还使用智能手机摄像头和应用程序来检测他的脉搏，如 Instant Heart Rate，并通过其他程序监控血压水平（Landau，2012）。

尽管目前的自我监测行为仍处于起步阶段并存在一些麻烦，但它们提供了自我感知的长远眼光，随着时间的推移，无疑将促使医疗保健的转型。这种超越普通传感方式的转型并非没有巨大的挑战。从家庭传感方式获得的数据不同于从一开始就使用规定的方法，医生可能会不重视或完全忽略这些数据的含义。因为医生和其他医疗专业人员对这些新来源的数据还需要一些斟酌的时间。使数据有意义将是至关重要和富有挑战性的，个人和他们的医师需要对整个临床系统进行改变，以充分利用数据的价值。

建立传感器测量值与疾病随时间变化的状态之间的关系将是很大的挑战。然而，如高性能计算（High Performance Computing，HPC）、云计算、大数据分析等工具都提供了关键技术使这些突破成为可能。医学正慢慢步入数字时代。Eric Topol 一直推崇医疗技术的使用，他曾说：“今天的医学都是关于均值、中值、布局和大规模筛选……都是不可接受且过时的！”Topol 长期支持医生根据传感器和智能手机上的应用数据开处方，以达到有效的诊断，而不是开一些药给病人再观察效果（Robbins，2012）。显然，这种健康医疗的未来展望将需要一段时间才能实现。如 Topol 等早期的开拓者正在创建新领域，将随着时间的推移作为推动健康医疗传感器和相关技术发展的催化剂。推测这些变化需要多长时间是具有挑战的。但公平地说，这些变化正以较慢的速度发生，比许多人预料或希望的更加缓慢。最终，医疗保健制度所面临的问题严重程度会迫使其发生根本改变，但在此之前的一段时间，还将徘徊在摇摇欲坠的边缘。

12.2.4　众包

众包或“共享感测”应用正变得越来越普遍。因为公众有动态反映他们所处的环境状况的机动性和能力，把他们作为感测源具有明显的吸引力。低成本传感器和智能手机等可联网移动设备的有效应用带动了众包受欢迎程度的增长。如第 11 章所述，个人之间的环境感知是一个新兴的应用领域。这些类型的应用很可能将继续增长和普及，特别是随着更多满足需求和兴趣的商业传感器平台的出现。

一旦最初的热情消退，许多问题亟待解决。检测的质量往往是有问题的。低成

本传感器经常被提供在把价格限定在一定范围内的产品中，往往将对数据质量造成损害。因此，传感器对待测目标的灵敏度和选择性可能是不够的。此外，该传感器可能不具有现场校准的功能，从而导致漂移和错误数据。总的来说，这些限制可能会导致任何众包检测数据的质量问题。这些问题将带来一个相当大的挑战：我们如何区分传感器读数之间准确和不准确？信息过载、“噪声”、恶意误导、偏置和信任等问题都需要在今后加以解决。这些都将是未来众包领域走向成熟的重要研究领域。

随着 Web2.0、云计算、移动计算等各种技术的驱动范式不断发展，它们将使众包检测在创造集体智慧模型中发挥更大的作用。建立这些模型需要对空气和水的质量等影响健康的问题产生共享的见解。众包检测就能快速建立并动态跟随这些问题的地理边界。尽管对数据质量和正确解释数据的能力有所担心，但众包检测授权于个人，提供民主化数据形式，将使其更有吸引力。寻找数据完整性，质量和可靠性等问题的稳健解决方案将是其成功的关键，并最终决定众包检测将如何被广泛地采用。

在未来的传感器应用中，除了参与式感测外，伺机传感可发挥关键性的作用，特别是在用于检测环境噪声污染、城市空气质量等环境领域。相较于目前占主导地位的参与式传感，伺机传感有潜力提供更大规模的数据量。然而，正如我们前面所讨论的，隐私和安全的尊重受到极大的关注，在这类应用可以大规模推广之前，需要有足够到位的保护措施。

12.2.5 传感技术交互

很多影响健康和幸福的因素已经确立。虽然作为个人我们没有必要用工具来衡量、跟踪、可视化和解释这些数据。但在信息通信技术发展的支持下，传感技术作为一种新兴的手段，使我们首次能够更好地理解和控制我们的健康和幸福，并了解我们周围的环境。综合整本书中讨论的各种原因，我们正处在思维模式的重大转折点上，传感器将更加普遍地分布到我们的生活中。它们将允许我们更早地发现健康问题，使干预或治疗变得更加有效。更重要的是，它们将能深入了解我们的行为、生活方式、周围环境、甚至是情绪状态如何影响到我们的健康和幸福。未来我们将作出明智的具有前瞻性的选择，并专注于尽可能地使我们保持在良好的状态。在大多数人的范围内，传感和信息通信技术使之成为一个更容易实现的目标。这些技术给我们提供了手段和能力去思考并获得自己健康命运的所有权。正如著名的爱尔兰作家奥斯卡·王尔德曾经说过的那样，“一个人倘若不为自己思考，那就从未思考过”。

参考文献

Manyika, James, *et al.*, "Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy. ", McKinsey Global Institute, http://www.mckinsey.com/insights/business_technology/disruptive_technologies, 2013.

The Economist Intelligence Unit, "The Internet of Things Business Index - A Quiet Revolution Gathers Pace", 2013.

Llamas, Ramon T. and William Stofega, "Worldwide Smartphone 2013-2017 Forecast", IDC, 2013.

Jones, Chuck. "*What Do People Use Their Cell Phones For Beside Phone Calls?*", Last Update: November 29th 2012, http://www.forbes.com/sites/chuckjones/2012/11/29/what-do-people-use-their-cell-phones-for-beside-phone-calls/

Zickuhr, Kathryn, "One-third of adults (and half of parents) now own a tablet computer," Pew Reseach Centre, http://libraries.pewinternet.org/2013/06/11/one-third-of-adults-and-half-of-parents-now-own-a-tablet-computer/, 2013.

Mainelli, Tom, "Worldwide and US Tablet 2013-2017 Forecast Updated: May 2013", IDC, 2013.

Lane, Nicholas D., Shane B. Eisenman, Mirco Musolesi, Emiliano Miluzzo, and Andrew T. Campbell, "Urban Sensing Systems: Opportunistic or Participatory," in *ACM 9th Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (HOTMOBILE '08)*, Napa Valley, CA, USA, 2008, pp. 11–16.

Kapadia, Apu, David Kotz, and Nikos Triandopoulos, "Opportunistic Sensing: Security Challenges for the New Paradigm," presented at the The First International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS), Bangalore, India, 2009.

Chew, Norma. "*The History of the Body Temperature Thermometer*", Last Update: Oct 7th 2008, http://voices.yahoo.com/the-history-body-temperature-thermometer-2026933.html?cat=37

Prater, Alicia M. "*The history of the body temperature thermometer*", Last Update: December 10th, 2008, http://www.helium.com/items/828424-the-history-of-the-body-temperature-thermometer

Sarasohn-Kahn, Jane. "*The future of sensors in health care - passive, designed, integrated*", Last Update: March 4th 2013, http://www.thedoctorweighsin.com/the-future-of-sensors-in-health-care-passive-designed-integrated/

Lee, Hyunkyu, *et al.*, "Examining cognitive function across the lifespan using a mobile application," *Computers in Human Behavior*, vol. 28 (5), pp. 1934–1946, 2012.

Miller, Geoffrey, "The Smartphone Psychology Manifesto," *Perspectives on Psychological Science*, vol. 7 (3), pp. 221–237, 2012.

Pei, Ling, *et al.*, "Human Behavior Cognition Using Smartphone Sensors," *Sensors*, vol. 13, pp. 1402–1424, 2013.

Versel, Neil. "*IMS report heralds the trough of disillusionment for mobile health apps*", Last Update: November 5th 2013, http://mobihealthnews.com/27054/ims-report-heralds-the-trough-of-disillusionment-for-mobile-health-apps/

Printed Electronics World. "*Printable Sensors*", Last Update: April 27th 2010, http://www.printedelectronicsworld.com/articles/printable-sensors-00002218.asp

Phys.org. "*Flexible, printable sensors detect underwater hazards*", Last Update: July 8th 2011, http://phys.org/news/2011-07-flexible-printable-sensors-underwater-hazards.html

Navone, Christelle, *et al.*, "Flexible Heat Flux Sensor for Firefighters Garment Integration," IGI Global, 2013, pp. 36–45.

Wei, Yang, Russel Torah, Kai Yang, Steve Beeby, and John Tudor, "Screen Printed Capacitive Free-standing Cantilever Beams used as a Motion Detector for Wearable Sensors," *Procedia Engineering*, vol. 47, pp. 165–169, 2012.

Crew, A., D. Lonsdale, N. Byrd, R. Pittson, and J. P. Hart, "A screen-printed, amperometric biosensor array incorporated into a novel automated system for the simultaneous determination of organophosphate pesticides," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 26 (6), pp. 2847–2851, 2011.

Alonso-Lomillo, M. Asunción, Olga Domínguez-Renedo, Liliana Ferreira-Gonçalves, and M. Julia Arcos-Martínez, "Sensitive enzyme-biosensor based on screen-printed electrodes for Ochratoxin A," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 25 (6), pp. 1333–1337, 2010.

Piermarini, Silvia, *et al.*, "Uricase biosensor based on a screen-printed electrode modified with Prussian blue for detection of uric acid in human blood serum," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 179, pp. 170–174, 2013.

Etherington, Rose. "*Biostamp temporary tattoo electronic circuits by MC10*", Last Update: March 28th 2013, http://www.dezeen.com/2013/03/28/biostamp-temporary-tattoo-wearable-electronic-circuits-john-rogers-mc10/

Corke, P., *et al.*, "Environmental Wireless Sensor Networks," *Proceedings of the IEEE,* vol. 98 (11), pp. 1903–1917, 2010.

Zhu, Chuan, Chunlin Zheng, Lei Shu, and Guangjie Han, "A survey on coverage and connectivity issues in wireless sensor networks," *Journal of Network and Computer Applications,* vol. 35 (2), pp. 619–632, 2012.

Leontiadis, Ilias, Christos Efstratiou, Cecilia Mascolo, and Jon Crowcroft, "SenShare: Transforming Sensor Networks into Multi-application Sensing Infrastructures," in *Wireless Sensor Networks*. vol. 7158, Picco, Gian Pietro and Wendi Heinzelman, Eds., Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 65–81.

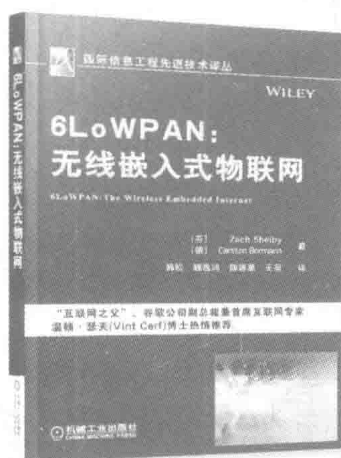
P4 Medicine Institute, "Quantifying Wellness. Demystifying Disease," http://p4mi.org/, 2012.

Landau, Elizabeth. "*Tracking your body with technology,*" Last Update: September 22nd 2012, http://www.cnn.com/2012/09/21/health/quantified-self-data.

——推 荐 阅 读——

6LoWPAN：无线嵌入式物联网

（芬）Zach Shelby 著　韩松　魏逸鸿　陈德基　王泉　译　　定价：59.8 元



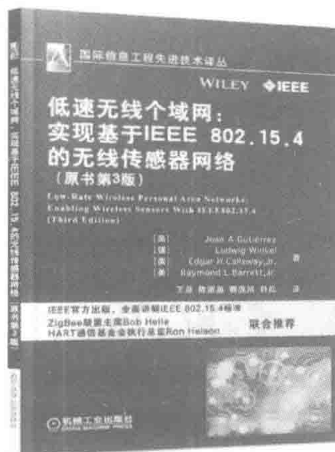
“互联网之父”、谷歌公司副总裁兼首席互联网专家温顿·瑟夫（Vint Cerf）博士热情推荐。

6LoWPAN（面向低功耗无线局域网的 IPv6）作为物联网的关键技术之一，该书详细和完整地介绍了 6LoWPAN、应用、相关标准以及网络部署和协议实现上的各种设计。使读者能全面地领略到基于 IPv6 的、低功耗的物联网技术。

本书适合物联网行业的研发人员、网络工程师、相关技术人员以及相关院校计算机、电子工程和信息工程专业的高年级本科生、硕士/博士研究生阅读，帮助其对 6LoWPAN 协议标准的了解，同时有利于推动物联网在我国的蓬勃发展。

低速无线个域网：实现基于 IEEE 802.15.4 的无线传感器网络（原书第 3 版）

（美）José A. Gutiérrez 著　王泉　陈德基　魏逸鸿　韩松　译　　定价：59.8 元



IEEE 官方出版，全面讲解 IEEE 802.15.4 标准
ZigBee 联盟主席 Bob Heile、HART 通信基金会执行总监 Ron Helson 联合推荐

IEEE 802.15.4 标准是物联网中最受欢迎、应用最广泛、最核心的技术，ZigBee 即是在其基础上定义的。本书全面讲解 IEEE 802.15.4 标准，将帮助你掌握 IEEE 802.15.4 标准以及其工作原理，更好理解物联网。

国际视野　科技前沿

本书提供了传感技术及其在医疗、健康和环境监测等应用中的广泛讲解。从传感器硬件到系统应用及案例研究，本书为读者提供了对技术的深入见解以及如何应用它们。我强烈推荐本书给对无线传感技术和相关应用感兴趣的人员。

——伦敦帝国理工学院 Dr. Benny Lo

本书以清晰易读的方式讲解了感知技术、传感器以及大量现有和新兴应用的复杂性。并探讨了将传感器网络与基于云的大数据分析结合，以提供大量新兴应用来改变人们生活方式的可能性。真正将大数据实用于改善个人生活与健康水平。

——都柏林城市大学 CLARITY传感器网络技术中心 国家传感器研究中心
项目首席科学家 Dermot Diamond

本书使读者了解传感器技术的端到端之旅，从工程的角度覆盖基础知识，介绍如何处理和可视化数据，同时提供许多应用领域的实际案例。这对任何学习传感器技术的人都是非常有益的。同时本书还为参与应用传感器系统研究和开发的人员提供了一个全面的讲解。我强烈推荐本书给任何希望扩大他们在这方面知识的工程师！

——阿尔斯特大学 生物医学工程教授 Chris Nugent



机械工业出版社微信公众号



E视界
传播电类内容提升专业知识



科技电眼
关注电类行业动向 聚焦前沿科技

Apress®

上架指导 工业技术／传感器


ISBN 978-7-111-54459-3

ISBN 978-7-111-54459-3

定价：89.00元

[General Information]
书名=智能传感器　医疗、健康和环境的关键应用
作者=（爱尔兰）迈克J.麦格拉思，克莱娜N.斯克奈尔著
页数=300
SS号=14138452
DX号=
出版日期=2017.01
出版社=北京机械工业出版社